

ASTROBIOLOGIA
UMA CIÊNCIA EMERGENTE

ORGANIZAÇÃO:
DOUGLAS GALANTE
EVANDRO PEREIRA DA SILVA
FABIO RODRIGUES
JORGE E. HORVATH
MARCIO G. B. DE AVELLAR

ASTROBIOLOGIA
UMA CIÊNCIA EMERGENTE

Organização

Douglas Galante
Evandro P. Silva
Fabio Rodrigues
Jorge E. Horvath
Marcio G. B. Avellar

Programa de Intercâmbio de Atividades de Cultura e Extensão – USP
Pró-Reitoria de Cultura e Extensão Universitária da USP

TIKINET

Produção editorial: Tikinet Edição Ltda
Edição de texto: Hamilton Fernandes
Preparação de texto: Amanda Coca
Revisão: Glaiane Quinteiro e Marilia Koeppl
Projeto gráfico: Maurício Marcelo
Diagramação: Maurício Marcelo e Rodrigo Martins
Capa: Vitor Teixeira

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Astrobiologia [livro eletrônico] : uma ciência emergente / Núcleo de Pesquisa em Astrobiologia. -- São Paulo : Tikinet Edição : IAG/USP, 2016. 10 Mb ; ePUB e PDF

Vários autores.
Bibliografia.
ISBN 978-85-66241-03-7

1. Astroquímica 2. Exobiologia 3. Vida - Origem 4. Vida em outros planetas I. Núcleo de Pesquisa em Astrobiologia Universidade de São Paulo.

16-00269 CDD-576.839

Índices para catálogo sistemático:
1. Universo : Existência de vida :
Astrobiologia 576.839

SUMÁRIO

PREFÁCIO

Desde o alvorecer da civilização, temos contemplado a beleza e as maravilhas do mundo natural que nos rodeia e nos perguntado sobre sua origem. Vasculhamos o passado e ficamos intrigados pelo futuro, e, por isso, somos únicos. Nossos ancestrais admiraram a vastidão do espaço e certamente pensaram que deveria haver outros além de nós.

Estamos agora em um momento único da história humana, quando podemos fazer essas mesmas antigas perguntas usando uma abordagem científica, e estudar rigorosamente as três grandes questões da astrobiologia: "De onde viemos?", "Para onde vamos?" e "Estamos sozinhos?". Essas questões fundamentais correspondem às que a humanidade vem se fazendo há milênios, e, provavelmente, fazem parte do que nos torna humanos. Assim, não há como evitar sermos atraídos por esse campo de pesquisa. A astrobiologia é, na realidade, uma "metadisciplina" usando toda ciência útil, onde ela puder ser encontrada. De um ponto de

vista prático, essa empreitada requer a interação de cientistas que, de outra forma, provavelmente não se encontrariam, necessitando de muito menos trabalho para o desenvolvimento de trabalhos de pesquisa colaborativos e altamente complexos.

Ao contrario de muitas outras disciplinas científicas, a astrobiologia tem implicações em como enxergamos a nós mesmos, como interagimos com a Terra e com o Universo. "De onde viemos" toca a questão do "porquê" que tanto tem intrigado não apenas cientistas, mas também filósofos e teólogos. "Para onde vamos" contribui para esse entendimento, mas também requer o envolvimento econômico e político, que estão atualmente no auge das discussões sobre mudanças climáticas. E "Estamos sozinhos" algum dia irá nos forçar a encarar o fato de que nós, como criaturas vivas, não somos únicos, ou, ao contrário, que estamos na verdade sozinhos no Universo, como resultado de uma história química tão improvável que resultou em um número amostral de apenas um, a vida na Terra. Qualquer desses resultados irá forçar novas considerações ética, como nossa relação com os "outros", ou sobre nossa solidão e a responsabilidade de sermos a única forma de vida no Cosmos.

Então, o que é astrobiologia? Vamos começar com o "De onde viemos". Um biólogo vai abordar essa questão olhando para a evolução da vida na Terra, usando ferramentas tradicionais como anatomia comparativa e paleontologia, assim como ferramentas mais novas, como as técnicas da biologia molecular. Mas isso não irá responder o porquê dessa história ter acontecido dessa forma, sem um conhecimento mais completo do ambiente interagindo com a vida. Qual era a temperatura nos diferentes momentos? Será que a Terra estava passando por um evento de glaciação global ou sendo bombardeada por meteoritos – ou mesmo um único, enorme e bem localizado asteroide, como o que atingiu a península de Yucatán 65 milhões de anos atrás. Esse evento jamais seria predito somente pela genética de populações, mas acabou tendo uma das mais profundas influências em nossa evolução, já que, sem ele,

talvez ainda estivéssemos em um mundo dominado pelos dinossauros, com os mamíferos se esgueirando escondidos.

Mas não é suficiente retrocedermos com o registro fóssil ou molecular apenas até o LUCA, o Último Ancestral Comum (da sigla em inglês). É preciso ir até a origem da vida em si. Como a vida surgiu? Como era o ambiente que propiciou esse acontecimento? Como acabamos tendo um planeta habitável? Ao final, como foi a origem e evolução de nosso Sistema Solar, galáxia, elementos biogênicos, de agora até o Big Bang?

A questão "Para onde vamos" costuma ser ignorada em muitos programas de astrobiologia, mas, na verdade, é a que tem maior importância imediata para todos nós. Enquanto o passado foi dominado por processos físicos e químicos, além de interações entre organismos, o futuro tem um novo grande jogador: nós. Apesar de (ainda) não termos a capacidade de impedir que nossa galáxia colida com outra, reiniciar a evolução do Sol ou parar a Lua em seu lento movimento de afastamento, todos esses fenômenos irão influenciar o futuro da vida na Terra. Nós já provamos que somos capazes de visitar outros corpos do Sistema Solar, com astronautas ou substitutos robóticos. Estamos alterando nossa composição atmosférica, e, em consequência, nosso clima. Temos o poder de extinguir espécies, inclusive a nossa própria. Mas também temos o poder para usar essas ferramentas científicas e tecnológicas para o bem comum, para estender nossa expectativa de vida e proteger nossos rios e florestas. Qual será nossa escolha?

E ainda há a questão na qual a ficção científica vira realidade: "Estamos sozinhos?" Enquanto muitas pessoas estão ansiosas por encontrar sinais de vida inteligente extraterrestre, essa criatura pode não compartilhar de nossa curiosidade ou valores. Mas e se houvesse uma civilização alienígena benevolente que pudesse se comunicar conosco, talvez com mútuo entendimento? O mais provável, em um futuro próximo, é a descoberta de uma forma de vida microscópica, menos evoluída que a terrestre. Note que eu não usei o termo "simples" para esse tipo de vida, pois não há

nada de “simples” na vida, seja ela qual for. O que nos trás de volta à pergunta: o que é vida?

Nesse contexto, onde entra o Brasil? Por quase uma década, tenho conhecimento do interesse em criar um programa de pesquisa em astrobiologia no país, após uma reunião para a qual fui convidada, organizada pelo Grupo de Pesquisa em Astrobiologia do CNPq, durante a Assembleia Geral da IAU (União Astronômica Internacional) no Rio de Janeiro, em 2009. Após esse evento, tomei conhecimento e participei de vários workshops sobre o tema no Brasil, culminando com a filiação do país como parceiro internacional do NASA Astrobiology Institute (NAI), em 2011. Cada vez que vou ao Brasil, fico impressionada com o entusiasmo da comunidade, tanto de cientistas como estudantes, sendo os últimos uma grande promessa para o futuro da astrobiologia no país. Novas instalações de pesquisa estão sendo construídas, para complementar os laboratórios que o Brasil já possuía. No meu próprio laboratório, nos Estados Unidos, fui privilegiada por ter um maravilhoso pós-doutorando brasileiro, Dr. Ivan Paulino-Lima, que é meu lembrete diário do programa bem-sucedido em desenvolvimento no país. Eu me sinto honrada de ser parte desse processo, e espero que essa colaboração e relacionamento duradouros continuem a florescer.

Novos conhecimentos, a reorganização dos conhecimentos atuais e novas missões espaciais são claramente necessários para o avanço da astrobiologia. Para ajudar o leitor a colaborar nessa busca, o que se segue é uma coletânea de tópicos que o permitirão degustar da riqueza dessa área de pesquisa. E, como em uma refeição fabulosa, deve deixá-lo com vontade de mais. Bem-vindo à astrobiologia!

Tradução de Douglas Galante

Lynn J. Rothschild, Ph.D.
Cientista Sênior, Nasa Ames Research Center

APRESENTAÇÃO

Alvorecer no terceiro planeta

Já houve um tempo em que o Universo foi pequeno. De bolso, quase. Menos de 2 mil anos atrás, o célebre astrônomo Ptolomeu de Alexandria teve a ousadia de estimar o tamanho do Cosmo e calculou que os objetos mais distantes – as estrelas de fundo que vemos no céu todas as noites – estavam a cerca de 130 milhões de quilômetros de nós. Pode parecer grande pelas nossas medidas cotidianas, mas na verdade era uma visão extremamente modesta do Universo. Hoje, sabemos que, numa esfera desse tamanho, não conseguiríamos acomodar nem mesmo a órbita da Terra em torno do Sol, com raio de aproximadamente 150 milhões de quilômetros (medida que os astrônomos definiram como a unidade astronômica, UA).

Conforme abandonamos o que diziam nossas intuições e nossos preconceitos acerca de como achamos que o Universo deveria

ser, descobrimos que a escala cósmica era muito maior. E pode colocar maior nisso. O tamanho do Universo observável, hoje sabemos, é cerca de 3 milhões de bilhões de vezes maior do que estimara Ptolomeu – 3×10^{15} unidades astronômicas, número tão grande que obriga os astrônomos abandonarem a "régua" das UAs e partirem para outras maiores, como os anos-luz ou os parsecs. (A mais popular delas, o ano-luz, equivale à distância que a luz percorre no vácuo em um ano de viagem, cerca de 9,5 trilhões de km, ou 63.241 unidades astronômicas. A fronteira do Universo observável, estimam os cosmólogos, está a cerca de 46,5 bilhões de anos-luz de nós.)

Nesse espaço inimaginavelmente vasto, a Terra e tudo que existe nela não passam de menos que um grão de areia. Com efeito, há mais estrelas no Universo que grãos de areia em todas as praias do nosso planeta. E, no entanto, ainda que não passe de um farelinho em meio à vastidão do Universo, nosso mundo tem uma peculiaridade que faz dele um lugar especial. Trata-se de um mundo com vida. Até o momento, o único que conhecemos que reconhecidamente serviu de palco para esse fenômeno incrível.

Incrível porque as reações químicas envolvidas no metabolismo dos organismos vivos – as complexas trocas e permutações de moléculas que estão acontecendo exatamente neste momento em todas as células do seu corpo, inclusive nos neurônios do seu cérebro que de algum modo estão transformando a informação visual presente nas páginas deste livro numa mensagem inteligível para você – são muito mais intrincadas do que tudo mais que já vimos por aí. As reações termonucleares que permitem que estrelas como o Sol brilhem e emitam copiosas quantidades de radiação ou a força gravitacional brutal que esmaga a matéria até produzir os misteriosos buracos negros são coisas complicadas, devemos admitir. Tão complicadas que, mesmo depois de muitas décadas de estudo intenso, ainda há perguntas não respondidas a respeito delas. Contudo, elas começam a parecer muito mais amigáveis à investigação quando deparamos com as reações moleculares envolvidas no metabolismo dos organismos vivos. É um nível de

complexidade tão alto que, até hoje, não sabemos como ele apareceu pela primeira vez.

De algum modo, aproximadamente 4 bilhões de anos atrás, aqui na Terra, apareceu um grupo de moléculas complexas com a capacidade emergente de se replicar – fabricar cópias de si mesma – segundo instruções codificadas em sua própria estrutura molecular. Não sabemos que molécula foi essa, nem como ela se formou, mas os pesquisadores têm trabalhado duro para compreender como isso pode ter acontecido: possivelmente o maior desafio intelectual já empreendido pela ciência.

A despeito das incertezas sobre sua origem, o que sabemos com certeza é que, por alguma rota química ainda não exatamente determinada, isso realmente aconteceu. E resultou no início do processo de evolução darwiniana por meio da seleção natural. A replicação imperfeita dessas moléculas primordiais produziu variedades de si mesmas, com pequenas diferenças nas instruções codificadas em sua estrutura. Algumas delas, mais eficientes no processo de replicação, logo dominaram o ambiente; outras, menos competentes, ficaram para trás e não deixaram descendentes. E assim a evolução teve início, num processo que levou, até agora, cerca de 4 bilhões de anos (uma escala de tempo tão inimaginável quanto a de espaço a que nos referimos há pouco), produzindo formas de vida as mais variadas e complexas. Até que, nos últimos milhões de anos, uma coisa ainda mais estranha aconteceu. Uma espécie ligeiramente diferente de primata começou a desenvolver um apreço cada vez maior pela atividade intelectual – possivelmente pelo incremento das relações sociais e a necessidade de fabricar ferramentas para sobreviver. Seu cérebro foi aumentando com o passar das gerações, moldado pela seleção natural, e esses primeiros humanos começaram a se intrigar com as misteriosas luzes que viam no céu à noite, assim como o brilho radioso do Sol durante o dia. O que significava tudo aquilo? A Terra, que já era um lugar especial por ter sido abrigo das intrincadas reações químicas que originaram a vida, agora chegava a uma fase ainda mais intrigante de sua existência: pela

primeira vez surgia um tipo particular de vida capaz de refletir sobre a natureza do Universo e buscar compreender o contexto de sua própria existência.

Ao longo dos últimos séculos (uma ninharia, se levarmos em conta os 4 bilhões de anos de evolução que nos precederam), essa espécie fez grandes avanços nesse esforço. Somos nós. Começamos a ter uma apreciação da escala e da organização do Universo, descobrimos que as mesmas leis da física regem fenômenos em toda parte e que a química básica que permeia o Sol e sua família de planetas, incluindo aí o nosso, não é diferente da que encontramos em outras partes do Cosmo. Sabemos que há outros sóis extremamente similares ao nosso por aí, e Terras igualmente parecidas. Não sabemos ainda com que frequência exata esses astros surgem e evoluem como os membros do Sistema Solar, em meio a todas as permutações possíveis na formação e evolução de sistemas planetários, mas é inevitável a convicção estatística de que o Sol e a Terra não são, ao menos por força da física e da química envolvidas em seu surgimento, singulares.

Resta então a derradeira pergunta: sendo a física e a química comuns em todo o Universo, será também a biologia? Pode o surgimento da vida na Terra ter sido fruto de um improvável acidente ou a atividade biológica, com toda sua rica complexidade, se manifestar sempre que as condições são favoráveis? Quais exatamente são essas condições? Com que frequência elas são atendidas? Que diferentes mundos podem abrigá-las e qual é a extensão de seu alcance pelo Universo afora? Essas são algumas das perguntas a que se propõe a responder a novíssima ciência da astrobiologia, que nas últimas décadas deixou de ser mero exercício de especulação para se firmar como uma das áreas mais promissoras da investigação científica no século XXI.

Podemos argumentar que, quando o filósofo italiano Giordano Bruno propôs, em 1584, que as estrelas do firmamento eram outros sóis, apenas distantes demais para que os percebamos pelo que eram, e que em torno desses sóis também havia planetas como o nosso, e que em alguns desses mundos havia seres vivos

como os terrestres, ele estava formulando uma hipótese astrobiológica – ainda que sem qualquer base experimental para corroborá-las. Acabou que, mais de quatro séculos depois, dessas três proposições, as duas primeiras já se mostraram comprovadamente corretas. A terceira – a que realmente diz respeito à astrobiologia – ainda carece de confirmação. Mas o empolgante é que agora, finalmente, temos os instrumentos de pesquisa necessários para tentar testar (e quem sabe confirmar) hipóteses como essa.

Para mim, como jornalista de ciência, foi especialmente empolgante ver o florescer da astrobiologia como ciência de vanguarda. Não só ela preenche algumas das expectativas mais elementares da curiosidade humana – a famosa busca pelo "de onde viemos e para onde vamos" – como sua sedimentação permite substituir a mitologia fantasiosa construída ao longo do último século sobre vida extraterrestre. Saem de cenas as pirações dos discos voadores, e entram em seu lugar experimentos científicos sólidos. Abandonamos assim o irrealismo esperançoso de que o conhecimento simplesmente vá descer do céu sobre nossas cabeças e passamos a praticar o que nossa espécie faz de melhor: construir o conhecimento a partir da base, aplicando com rigor o método científico e mantendo a mente aberta para o que quer que o Universo esteja disposto a nos oferecer.

Ainda há muitas coisas que não sabemos sobre a vida e seu potencial para além do planeta Terra. Mas a maior surpresa que este livro pode trazer para você, caro leitor, é a descoberta de quanto nós já sabemos. Não é pouca coisa. Nas próximas páginas, você terá um panorama sólido acerca das principais questões que cercam a astrobiologia hoje, desde o surgimento dos elementos químicos (preceito fundamental para que pudéssemos ter nosso metabolismo baseado em moléculas complexas de carbono diluídas em água) até o futuro da vida, na Terra e fora dela, passando pelos desafios para a compreensão da química prébiótica e pelos grandes saltos evolutivos que levaram à emergência de vida complexa e inteligente em nosso pequeno grão de areia, em meio à imensidão do Universo.

Os capítulos desta obra foram escritos por alguns dos maiores especialistas brasileiros em astrobiologia e refletem o trabalho do Núcleo de Pesquisa em Astrobiologia (NAP/Astrobio), o que confere exatidão e confiabilidade a seu conteúdo. Prepare-se portanto para um mergulho na fascinante ciência que reflete essa busca ancestral da humanidade pela compreensão de qual de fato é o seu lugar no Cosmo. Tenho certeza de que, ao terminar a leitura, você sairá com a convicção de que somos todos privilegiados por estarmos vivos justamente nessa época de nossa história. A contínua aventura do conhecimento, carregada de geração a geração desde que os primeiros humanos passaram a caminhar sobre a Terra, está chegando à sua fase mais entusiasmante – e apenas começando.

Salvador Nogueira

Jornalista de ciência, escreve atualmente para a coluna Mensageiro Sideral da Folha de S.Paulo e é autor de nove livros, entre os quais, "Extraterrestres", "Rumo ao Infinito" e "Conexão Wright-Santos-Dumont".

INTRODUÇÃO

Este livro é resultado do trabalho colaborativo de vários autores, especialistas em suas áreas, mas que aceitaram o desafio de escrever dentro de um contexto mais amplo. Foi organizado de maneira temporalmente linear, começando com uma apresentação sobre o tema e logo entrando na história do Universo. Nesse caminho, passamos pela formação dos átomos, o início das interações moleculares e complexificação química, ainda no ambiente espacial. Com a evolução do Universo, a gravidade continuou seu caminho, moldando a matéria em nuvens que se condensaram, formando estrelas e, hoje sabemos, quase sempre acompanhadas de planetas. Partimos então para explorar a diversidade desses mundos e o que os torna habitáveis.

A química da origem da vida é revisada em dois capítulos, junto com os esforços mais recentes de tentar recriar as condições das primeiras centenas de milhões de anos do planeta em laboratório. Uma vez que a vida surgiu, ela evolui e se espalhou por

praticamente todos os ambientes do planeta, utilizando as mais diferentes estratégias adaptativas. Hoje podemos recontar essa história com provas factuais do processo evolutivo pelo estudo dos fósseis, e todo esse conhecimento sobre a vida na Terra pode então ser usado para procurar vida fora dela, seja no Sistema Solar ou além dele, nos exoplanetas.

Por fim, discutimos os esforços e avanços em busca de vida inteligente extraterrestre, bem como sobre o futuro da própria vida na Terra. Talvez sejamos demasiadamente otimistas, mas acreditamos que ainda há grandes horizontes para serem explorados pela humanidade, seja em nosso planeta ou muito além do Sistema Solar. A aventura humana está apenas começando, e temos, em nossas mãos e em nossos cérebros, todas as ferramentas para irmos muito longe!

A astrobiologia é uma área de pesquisa recente no Brasil e no mundo. Ainda sem um programa de pós-graduação específico no país, os estudantes que decidem seguir por essa área têm se formado em diversos cursos, como física, química, biologia, astronomia, geologia etc., procurando por orientadores de iniciação científica, mestrado e doutorado que os acolham com um projeto sobre algum problema de interesse da astrobiologia. No entanto, há uma grande falta de informação, sobretudo em português, tanto para alunos quanto professores, sobre o que é de fato astrobiologia, e como se fazer uma pesquisa na área. De um lado, os alunos querem um trabalho de "pesquisa astrobiológica", e os professores, que normalmente tiveram uma formação mais especializada, dificilmente entendem o que isso quer dizer e propõem projetos mais tradicionais e especializados. O resultado costuma ser frustração mútua, e desistência do aluno e do orientador em seguir pela área.

Muita dessa desinformação é decorrente da novidade do tema, da falta de cursos sobre o assunto e da falta de material atualizado em português, o que permitiria um alcance maior dos conteúdos que vêm sendo desenvolvidos pela comunidade nos últimos anos. Este livro é resultado direto da demanda que nós, pesquisadores associados ao Núcleo de Pesquisa em Astrobiologia

da Universidade de São Paulo, percebemos desde a criação do núcleo, em 2011. Esperamos que ele, apesar de não ser completo, dada a vastidão do tema, contribua para catalisar mais iniciativas de produção sobre o assunto em português, e que possa ser usado para nortear e incentivar novos alunos brasileiros a se aventurarem na área, de forma crítica e rigorosa.

A astrobiologia não é, em sua formulação atual, uma nova disciplina científica, nem mesmo é detentora de respostas que nenhuma outra ciência pôde obter até agora. Não há magia ou milagre, apenas trabalho duro e criatividade. A astrobiologia pode ser vista como uma área de pesquisa multi, inter e até transdisciplinar, que procura maneiras novas para entender o fenômeno da vida no Universo, sua origem, evolução, distribuição e futuro. Funciona, acima de tudo, como uma perspectiva para melhorar a comunicação e o intercâmbio de ideias entre pesquisadores de diferentes áreas com um interesse comum, a origem e evolução da vida no universo.

Vários de nós, jovens pesquisadores na área, tivemos a oportunidade de ser expostos a essa visão durante a pós-graduação, participando de escolas internacionais de astrobiologia (seja aqui feito um agradecimento especial aos organizadores da Escola de Inverno de Astrobiologia do Havaí, Escola de Verão de Astrobiologia dos Países Nórdicos e da Escola de Verão de Astrobiologia de Santander, na Espanha), nas quais ficou claro que, uma vez vencidas as barreiras de comunicação, ter contato com colegas de diferentes áreas permite novas perspectivas e soluções para antigos problemas cristalizados – coloque um físico teórico para fazer experimentos de microbiologia em uma geleira na Islândia e tudo pode acontecer!

Esse intercâmbio de ideias é o que a astrobiologia tem de melhor e o que, em nossa visão, realmente vale a pena ser mantido e melhorado. No Brasil, em 2011, organizamos com grande sucesso a São Paulo Advanced School in Astrobiology (Spasa, 2011), financiada pela Fapesp, para atrair novos talentos para a área.

Esperamos fazer mais eventos como esse e ficamos felizes de ver outras iniciativas já surgindo pelo país.

Mas não podemos esquecer – a astrobiologia ainda é uma área em consolidação e, por isso mesmo, muito dinâmica. Sua continuidade depende do interesse crescente da comunidade no tema, para garantir seu financiamento, criação de cursos, formação de pessoas e mesmo, quem sabe, abertura de vagas para pesquisadores/professores específicas para o assunto. Pode ser que ela venha a ser substituída por outro termo no futuro, como "habitabilidade", ou caia em desuso, sendo mantido o termo mais comum – "ciências planetárias". Isso é algo para o futuro, mas de menor importância, pois o que realmente vale a pena é desbravar as fronteiras do conhecimento e compreendermos nosso lugar no Universo.

Até o momento, não há um projeto de pesquisa em astrobiologia, mas projetos em áreas específicas e mais clássicas (física, química, biologia, astronomia e geologia), com uma visão interdisciplinar e conectada a um problema mais geral sobre a vida no Universo. Além do projeto em si, é importante que se invista na formação sólida em uma área de maior interesse (que possivelmente será aquela em que a carreira dos pesquisadores terá continuidade), também procurando expô-los a outras áreas de pesquisa, de maneira que tenham facilidade de diálogo em qualquer tema e uma boa rede de contatos, para sempre saber onde ou quem procurar, para achar a informação que precisam. Na ciência, é importante fazer escolhas por paixão, mas também levando em conta as aptidões pessoais necessárias nas diferentes áreas e, de forma muito pragmática, o mercado futuro de profissões. Levando em conta esses fatores, as chances de desenvolver uma carreira bem-sucedida e que satisfaça seus anseios serão muito maiores!

Astrobiologia: uma ciência emergente faz parte da missão de disseminação do conhecimento proposta pelo NAP/Astrobio, apoiada e financiada pela Pró-reitoria de Cultura e Extensão Universitária da USP, além de parte do compromisso com ensino e educação como parceiro internacional do Nasa Astrobiology Institute (NAI) e a European Astrobiology Network Association

(EANA). A produção deste livro foi um prazer para seus organizadores, que tiveram a oportunidade de aprender um pouco mais sobre outros temas e interagir com pessoas muito diferentes, dedicadas e com histórias para serem contadas. Ao final, esperamos que um pouco dessa rica experiência humana que vivenciamos possa ser passada para os leitores, e que este seja apenas o início de suas próprias buscas. Sejam os novos exploradores do Universo e não se esqueçam – o conhecimento só faz sentido se puder ser compartilhado e vivenciado em toda sua riqueza humana!

Os Organizadores

AGRADECIMENTOS

Agradecemos o apoio de vários alunos e colegas, muitas vezes trabalhando de forma anônima, mas, sem os quais, este livro seria impossível. Aos queridos alunos da primeira turma do curso de pós-graduação em astrobiologia da USP (BTC 5831), em cujas discussões muitos textos deste livro nasceram, e ao pós-graduando André Arashiro Pulschen, que desenhou e aprimorou a capa. Agradecemos também a todos os integrantes do NAP/Astrobio, alguns dos quais não participaram diretamente do livro, mas contribuíram para sua viabilidade; aos organizadores das escolas internacionais de astrobiologia, que contribuíram para a formação de vários organizadores e autores desta edição, em especial Karen Meech, Wolf Geppert, Bruce Runnegar e Vicky Meadows. Também agradecemos ao incessante apoio e incentivo do diretor do Nasa Astrobiology Institute, Carl Pilcher, bem como de Gerda Horneck, ex-diretora da EANA. Agradecimentos especiais a Lynn Rothschild, pelo apoio constante, desde a formação da primeira geração de astrobiólogos brasileiros, e pelos momentos fantasticamente humanos que dividimos em diversas oportunidades.

ASTROBIOLOGIA

Estudando a vida no Universo

Capítulo 1

Fabio Rodrigues, Douglas Galante e Marcio G. B. Avellar

A astrobiologia, na visão atual, é definida como um campo de pesquisa dedicado a entender a origem, a evolução, a distribuição e o futuro da vida, na Terra ou fora dela (Blumberg, 2003). Dessa forma, algumas das principais perguntas que os astrobiólogos tentam responder vêm sendo feitas pela humanidade há milênios: "como a vida se originou e evoluiu na Terra?", "existe vida em outros planetas?" e "como a vida se adaptou a um planeta em constante mudança e como ela o fará no futuro?" (Des Marais; Walter, 1999). A astrobiologia propõe uma abordagem multi e interdisciplinar, baseada nas técnicas e no rigor da ciência moderna para essas questões, as quais são apenas o início para a melhor compreensão do fenômeno da vida no Universo.

Um fato marcante para o reconhecimento dessa área de pesquisa se deu em 1998, quando a Nasa, agência espacial norte-americana, reestruturou e ampliou o escopo de seu antigo programa de exobiologia, dedicado a procurar vida fora da Terra, renomeando-o como programa de astrobiologia, criando assim o Instituto de astrobiologia da Nasa (NAI), um dos pioneiros no tema

(Blumberg, 2003). Essa mudança ocorreu após a Nasa perceber que, paralelamente à busca de vida fora da Terra, era necessário entender melhor a vida em nosso próprio planeta, a única que conhecemos e que deveria ser utilizada como modelo para entender uma possível vida extraterrestre. Por exemplo, quando se pensa na possibilidade de vida em outro planeta, uma das perguntas que surgem é sobre sua origem. É necessário, ainda, conhecermos bem o cenário e as condições para o surgimento da vida na Terra, antes de podermos extrapolar o mesmo evento para outros planetas.

Analogamente, tratando da detecção de vida extraterrestre, novamente o exemplo da Terra nos direciona aos tipos de organismos que são mais propícios a existirem em outros ambientes e a como detectá-los, seja com sondas no próprio local, seja da Terra, por meio de telescópios. Sabe-se que, na Terra, os primeiros organismos que surgiram foram os unicelulares, que permaneceram dominantes por bilhões de anos até o surgimento dos multicelulares, sendo que, até hoje, organismos unicelulares perfazem a maior parte da massa viva da Terra. Dessa forma, um dos principais objetos de estudo da astrobiologia são micro-organismos, como as bactérias (Des Marais, 2008).

No atual estágio de entendimento científico da biologia, é muito difícil desenvolver estudos sobre uma forma de vida muito diferente da que conhecemos na Terra, não na aparência em si, mas em seu funcionamento molecular. Dessa maneira, a astrobiologia se baseia fortemente na compreensão da vida na Terra como modelo para a vida extraterrestre.

Segundo a própria Nasa, o termo “astrobiologia” não foi criado em 1998 (Blumberg, 2003), mas já vinha sendo usado em diferentes contextos, desde a década de 1940, sendo seu primeiro uso na língua portuguesa registrado em 1958, quando o biólogo paulista Flávio Augusto Pereira escreveu um livro intitulado *Introdução à astrobiologia*. Antes do termo “astrobiologia” se consolidar, com a fundação do instituto da Nasa, diversos grupos e associações já vinham utilizando os termos “exobiologia”, “bioastronomia” e “cosmobiologia” que, apesar de estarem, hoje, caindo em desuso,

ainda são encontrados com significados muito similares ao da atual astrobiologia (Rodrigues, 2012). O termo “astrobotânica” também foi usado ao longo da história, uma vez que se acreditava, no início do século XX, que as plantas seriam as formas de vida mais resistentes e os candidatos mais prováveis a habitarem outros planetas.

Da corrida espacial à astrobiologia moderna

O avanço da tecnologia, ao longo da história da humanidade, permitiu estudos mais detalhados sobre o nosso planeta, aumentando nosso conhecimento sobre os processos naturais em diversas áreas da ciência, incluindo a astrobiologia.

Se, na Grécia Antiga, as discussões sobre possibilidade de vida fora da Terra foram pautadas em pressuposições filosóficas, uma vez que pouco se conhecia sobre outros corpos celestes, a invenção dos telescópios permitiu os primeiros estudos científicos e sistemáticos sobre esses corpos. Ainda que muito rudimentares, se comparados ao que temos hoje, esses estudos foram essenciais para incentivar novas gerações de cientistas e inventores a avançarem no tema (Dick, 1980).

Ao comparar as observações do planeta Marte ao longo do tempo (Figura 1.1), é inegável como o avanço tecnológico possibilitou diferentes descobertas e a expansão de nosso conhecimento.

Sendo assim, a astrobiologia moderna foi um avanço a partir da exobiologia, que deve ser entendida no contexto da história da humanidade no século XX. A segunda metade desse século foi marcada pela Guerra Fria, disputa por hegemonia e poder entre as duas potências econômicas do pós-Segunda Guerra Mundial: Estados Unidos e União Soviética. Essa disputa se manifestou, entre outros aspectos, na dominação tecnológica, e talvez seu maior exemplo seja a corrida espacial.

A União Soviética saiu vitoriosa ao mandar o primeiro satélite para o espaço (*Sputnik I*, em 1957) e o primeiro mamífero ao espaço (a cadela Laika, no *Sputnik II*), evento que foi seguido pelos norte-americanos com o envio dos macacos Able e Baker (no foguete *Jupiter AM-18*, em 1959). A União Soviética foi também

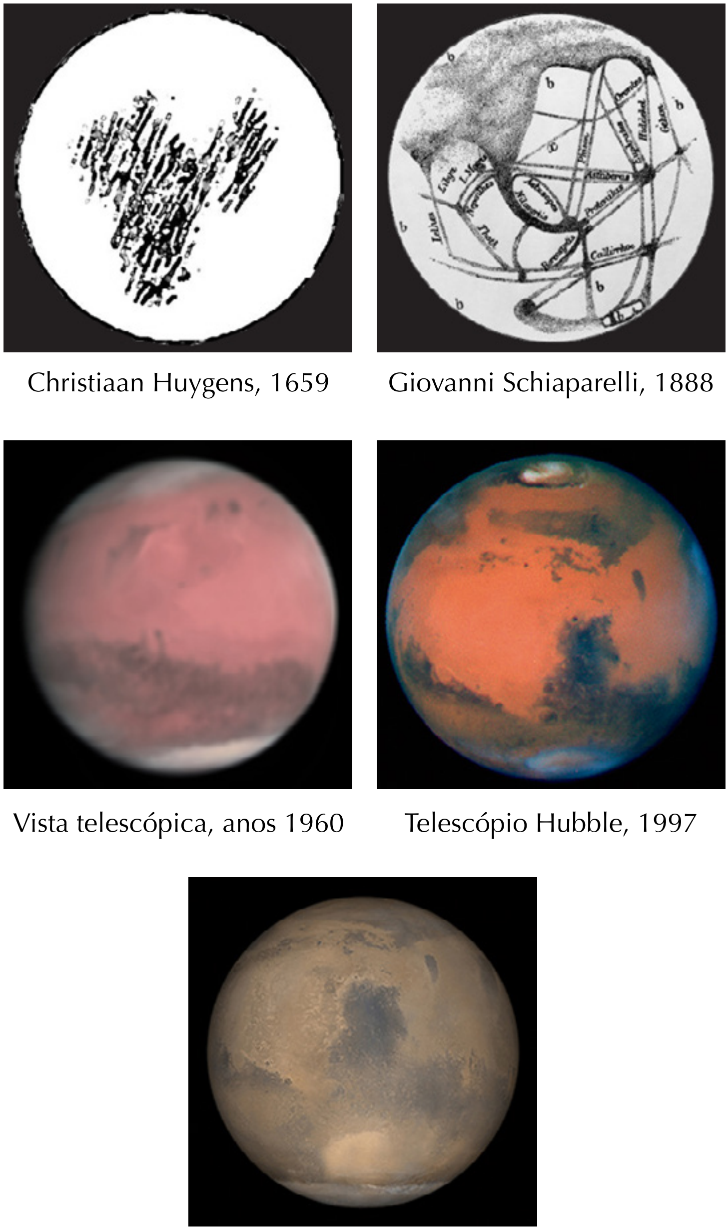

Christiaan Huygens, 1659
Giovanni Schiaparelli, 1888
Vista telescópica, anos 1960
Telescópio Hubble, 1997
Mars Global Surveyor, 2002

Figura 1.1. Diferentes observações/representações de Marte ao longo do tempo. Fonte: Flammarion, C. La Planète Mars (Bibioteca Nacional, Paris); Nasa/JPL/Malin Space Science Systems

pioneira em mandar uma sonda que atingiu a Lua, chocando-se propositalmente com ela (sonda *Luna 2*, em 1960) e em mandar o homem para o espaço (Yuri Gagarin, na *Vostok I*, em 1961). Os Estados Unidos finalmente conseguiram uma vitória com a chegada do homem na Lua, em 1969, com Neil Armstrong, Buzz Aldrin e Michael Collins, feito que impressionou o mundo (Phillips, 2009).

Durante esse processo da corrida espacial, surgiu a preocupação com os danos causados pelo ambiente espacial aos astronautas e cosmonautas, dando origem à medicina espacial. Posteriormente, a Nasa concluiu que seria de extremo interesse realizar "investigações sobre o efeito do ambiente espacial em organismos vivos, incluindo a busca por vida extraterrestre". Na verdade, o interesse pela resposta de organismos vivos em condições espaciais e pela possibilidade de vida fora da Terra foi impulsionado pelo medo da contaminação cruzada: havia a preocupação que, caso existisse vida fora da Terra, esta pudesse ser trazida para a Terra, trazendo doenças catastróficas, ao mesmo tempo que se procurava evitar a contaminação de outros planetas e corpos celestes com organismos da Terra. Do princípio da corrida espacial até hoje, a proteção planetária é uma das grandes preocupações dos programas de exploração espacial (Dick, 2009).

Como consequência desses interesses e preocupações, surgiu o programa da Nasa de exobiologia, assim batizada para ser diferenciada da biologia convencional. Entretanto, essa nova área, instituída nos anos 1960, não foi um consenso na comunidade científica norte-americana. Ramos mais tradicionais, como a biologia evolutiva, tiveram o financiamento abalado com o surgimento da biologia molecular (após a descrição da estrutura do DNA por Watson e Crick, em 1953) e sentiram-se novamente ameaçados por essa nova competidora no financiamento governamental.

A exobiologia conseguiu se consolidar pelo interesse do governo nessas pesquisas e pelo apoio de nomes fortes na ciência dos Estados Unidos, como o de Joshua Lederberg, prêmio Nobel

de Medicina em 1958 por seus trabalhos em genética e criador do termo "exobiologia" para descrever a busca científica de vida fora da Terra.

Desde o começo da corrida espacial, os cientistas e, em particular, a Nasa, fizeram uso do grande apelo desse tema para justificar à população os gastos bilionários das missões espaciais. O reconhecido trabalho de divulgação científica que a Nasa criou serviu, e serve até hoje, para manter ativo esse interesse, fomentando a curiosidade popular. É preciso considerar, também, os impactos sociais e culturais da busca de vida extraterrestre. Esse tema, debatido por séculos tanto nas culturas ocidentais como orientais, rendeu livros científicos e de ficção, motivou a criação de novos e sofisticados instrumentos de pesquisa, influenciou religiões e correntes filosóficas (Crowe, 1997; Dick, 2000). Atualmente está mais presente que nunca nas artes, filmes, livros etc. A vida extraterrestre se tornou um fenômeno cultural em nossa sociedade, atraindo enorme interesse da população mundial.

No entanto, a exobiologia, apesar de atraente, levantou muitas críticas. Em especial, foi descrita como uma ciência sem um objeto de estudo, uma vez que se propunha a estudar vida fora da Terra, que ainda não sabemos se existe. Além disso, depois de cerca de 50 anos de existência, a exobiologia não havia encontrado nenhuma evidência de vida extraterrestre.

Com o avanço das pesquisas espaciais e as sucessivas dificuldades nas missões de busca de vida fora da Terra, a Nasa optou por mudar o enfoque de "exo" para "astrobiologia", criando assim uma ciência com objeto de estudo mais palpável: a vida na Terra e no Universo. Percebe-se então que a astrobiologia foi criada como consequência direta do avanço tecnológico e da conquista do espaço, mas também é resultado das condições políticas, sociais e financeiras, como todas as áreas da atividade humana. Atualmente, ela está se estabelecendo como uma área de pesquisa sólida, principalmente pela ampliação de seu escopo e por sua própria evolução, ao se tornar uma ferramenta de integração muito eficiente. Certamente, uma das principais características positivas da astrobiologia é sua

capacidade de integrar pesquisadores de diferentes áreas para trabalharem com um enfoque inter e multidisciplinar em problemas científicos extremamente complexos, mas essenciais para compreendermos o fenômeno da vida no Universo (Des Marais; Walter, 1999).

Por que estudar astrobiologia?

A maioria das perguntas propostas pela astrobiologia não é nova e acompanha a humanidade há milhares de anos. Especulações sobre a possibilidade de vida fora da Terra e de como seriam esses habitantes são frequentes na ciência e na filosofia desde a Grécia Antiga. Um dos grandes debates naquela época era sobre a pluralidade dos mundos, ou seja, se a Terra seria única ou se existiriam outros planetas como o nosso, com capacidade para abrigar vida. Os pluralistas, como Demócrito, Leucipo e Zenão, defendiam que deveria haver vários planetas, alguns distintos e outros com características semelhantes às da Terra. Por outro lado, os singularistas, como Aristóteles e Platão, acreditavam que a Terra era única e que apenas aqui poderia haver vida. Essa discussão se prolongou por toda a história, movimentando diversos cientistas, filósofos, teólogos e escritores importantes (Dick, 1982).

Quanto à origem da vida, muito antes das modernas teorias envolvendo a química e a biologia, observa-se que praticamente todas as civilizações humanas possuem mitos de cosmogonia para tentar explicar a origem do Universo e dos seres vivos. Um exemplo é o mito do ovo cósmico, possivelmente citado pela primeira vez no *Brahmanda Purana*, um dos dezoito textos religiosos hindus, as *Marapuranas*. "Brahmanda" quer dizer literalmente o "ovo de Brahma", e é uma referência ao Universo criado, incluindo a vida.

Tanto a busca por uma explicação para a origem da vida na Terra quanto a especulação sobre vida extraterrestre estão, intimamente ligadas à busca de nosso lugar e objetivo no Universo. Dessa forma, os temas tratados pela astrobiologia são de grande impacto no imaginário popular, encontrando-se profundamente enraizados na cultura e sociedade.

Desde sua formalização e popularização pela Nasa, a astrobiologia não se propôs a ser uma nova ciência com objetos de estudos próprios e diferentes das áreas de conhecimento tradicionais, mas, sim, um novo enfoque para antigas perguntas, que dificilmente seriam respondidas utilizando-se as disciplinas tradicionais de forma isolada. A astrobiologia nasceu com a proposta de criar um ambiente inter e multidisciplinar para discussão sobre a vida, enfocando não apenas a Terra como sistema fechado, mas suas interações com o meio astrofísico, incluindo todos os fenômenos de nossa vizinhança cósmica – no passado, presente ou futuro. Nosso planeta foi formado como subproduto das reações nucleares em estrelas e supernovas antigas, sua química foi forjada nas nuvens moleculares do espaço e, até hoje, a Terra recebe energia do Sol, partículas dos raios cósmicos, impactos e matéria trazida dos confins de nosso Sistema Solar pelos cometas e asteroides.

A expansão da exobiologia para a atual astrobiologia se deu exatamente quando a comunidade científica percebeu que a busca de vida fora da Terra deveria ser orientada pelo melhor conhecimento da vida no próprio planeta. Por exemplo, para entendermos se a vida pode se originar em outro planeta, temos que estudar amplamente o caso terrestre, considerando o meio astronômico, a geologia do planeta, os eventos atmosféricos e as reações químicas que poderiam ocorrer. Da mesma forma, para sabermos o que procurar em outro planeta, tomamos como base a vida como a conhecemos na Terra e tentamos extrapolar nosso conhecimento biológico para as condições ambientais extraterrestres.

Abordagem e temas tratados pela astrobiologia

De forma geral, a astrobiologia se propõe a observar a vida de um ponto de vista bastante amplo, considerando as diversas interações com o corpo celeste que a abriga e com seu ambiente astrofísico. Essas interações são intrinsecamente dinâmicas, mudam com o tempo, e assim a vida segue a evolução do planeta e do Universo, mas, ao mesmo tempo, também altera seu ambiente, em um ciclo extremamente complexo.

A compreensão da vida no Universo – sua origem, evolução e eventual término – é um tema que requer, necessariamente, a contribuição de pesquisadores de diferentes áreas, como astrônomos, cientistas planetários, químicos, geólogos, biólogos, e muitos outros, incluindo pesquisadores das engenharias e até mesmo das ciências humanas. Só seremos capazes de encontrar vida em outros planetas, seja do Sistema Solar ou fora dele, se formos capazes de integrar nossos conhecimentos, de maneira a decifrar os sinais sutis e complexos da vida. Apesar de o paradigma científico/acadêmico contemporâneo criar pesquisadores e alunos cada vez mais especializados em seus respectivos temas de estudo, se quisermos realmente compreender a vida nesse grande contexto, é necessário criarmos estratégias para aumentar a comunicação e colaboração entre as áreas. E é nesse ponto que a astrobiologia se mostra como uma poderosa ferramenta, criando a linguagem e a oportunidade de transpor barreiras acadêmicas criadas artificialmente pela sociedade.

A seguir são apresentados alguns dos temas centrais da astrobiologia, os quais serão tratados em maior detalhe nos próximos capítulos deste livro (Mix et al., 2006). No entanto, temos que ter em mente que a astrobiologia ainda é uma área muito recente e em construção, sendo que novos temas podem ser incorporados a essa lista, que não tem pretensão de ser completa.

Cosmologia e astrofísica

O Universo tem uma idade aproximada de 13,7 bilhões de anos e, desde o evento do Big Bang (Figura 1.2), vem evoluindo, mudando com o tempo. A gravidade moldou suas grandes estruturas, desde a geometria do Universo até a forma das galáxias e estrelas. A mesma gravidade serve como fonte de energia para os processos de fusão nuclear estelar que produziram praticamente todos os elementos químicos que conhecemos em nossa tabela periódica. Dessa maneira, o entendimento dos mecanismos físicos do Universo é essencial para entendermos a origem e a modificação da matéria-prima para os planetas e para a vida.

Astroquímica

Os núcleos produzidos no Big Bang e nas estrelas se distribuiriam pelo Universo com o tempo, aumentando a complexidade química existente. Conforme a temperatura média do Universo foi diminuindo esses núcleos capturaram elétrons, formando os átomos, os quais começaram a interagir por forças eletrostáticas, ou seja, cargas positivas e negativas se atraindo e repelindo, formando assim as ligações químicas e as moléculas. Como a densidade média do Universo é muito baixa, ordens de grandeza mais baixas que às que estamos acostumados na Terra, essas reações acontecem lentamente, demorando até centenas de milhares de anos. Hoje somos capazes de detectar centenas de diferentes moléculas no espaço, inclusive orgânicas, espalhadas por todo meio interestelar, especialmente concentradas em regiões de maior densidade, como as nuvens moleculares ou discos protoestelares. Essas moléculas forneceram a matéria-prima para que a química prebiótica ocorresse em nosso planeta e a vida surgisse.

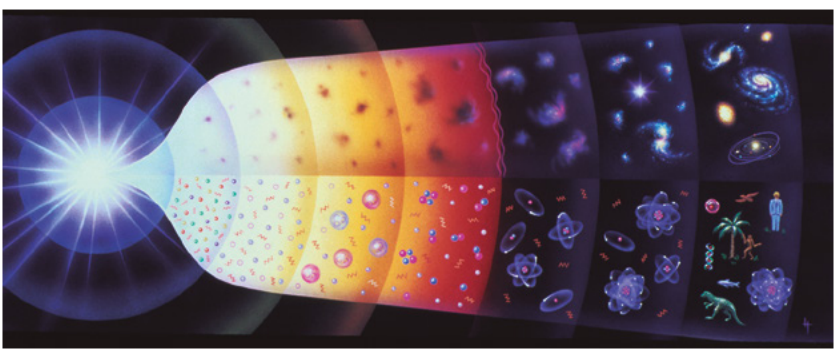


Figura 1.2. A história de nosso Universo, do Big Bang até o surgimento da vida. Fonte: Latin Stock

Formação planetária

Essa é uma área da astronomia em grande expansão, pois até pouco tempo atrás conhecíamos muito pouco sobre o processo de formação planetária. Será que toda estrela possui planetas?

Nas últimas duas décadas, o número de exoplanetas descobertos tem aumentado rapidamente graças aos avanços tecnológicos;

agora já podemos comparar os resultados de nossos modelos teóricos e computacionais com casos reais para sabermos se planetas parecidos com a Terra são comuns no Universo. Atualmente, os dados parecem indicar que praticamente toda estrela é formada junto com um sistema planetário, o que aumenta muito a chance de existirem corpos celestes com condições de habitabilidade.

Química prebiótica e origem da vida

Após a formação dos elementos químicos e de algumas moléculas no meio interestelar, o passo seguinte foi a formação das moléculas-base para a vida: as proteínas, lipídeos, ácidos nucleicos entre outros. Entretanto, esse processo de formação de moléculas complexas, com funções biológicas como armazenamento de informação química e de energia, estrutura etc., não está completamente compreendido. E como essas moléculas se organizaram em sistemas químicos autossuficientes, capazes de se multiplicarem e evoluírem (o que já podemos chamar de vida, segundo algumas definições), é um dos temas mais desafiadores na pesquisa sobre a origem da vida. Acredita-se que minerais presentes na superfície da Terra catalisaram essas reações e que existem diversos ambientes no planeta onde a vida poderia ter surgido. Certamente esse processo teve diversas etapas que ainda não foram bem elucidadas pela ciência.

Evolução

Todas as formas de vida que conhecemos no planeta têm uma propriedade em comum: são capazes de se reproduzir (ao menos como população), gerando descendentes com características ligeiramente diferentes das da geração parental (devido, por exemplo, às mutações espontâneas ou induzidas), o que leva a um sucesso reprodutivo diferencial, ou seja, alguns indivíduos dessa geração conseguirão deixar mais descendentes que outros, fixando, assim, as características na população. Essa é a base para o processo de evolução darwiniana – descendência com modificação –, que levou a vida do primeiro ser vivo à biodiversidade

que vemos atualmente. Hoje discutimos a universalidade desse processo: toda forma de vida deve passar por um processo de evolução darwiniana? Mesmo em outros planetas, talvez com condições muito diferentes e até com sistemas "vivos" muito diferentes do que conhecemos?

Fósseis: a história da vida em nosso planeta

Entender a vida passada na Terra é fundamental para compreendermos quais foram os primeiros seres vivos que habitaram o planeta, que nos dão pistas sobre a origem da vida e sobre como a evolução na Terra de fato ocorreu (Figura 1.3). Descobrir sinais de vida passada é igualmente importante para a busca de sinais de vida fora da Terra, principalmente se for uma vida extinta – nossas sondas em Marte, como a *Curiosity*, têm uma chance muito maior de encontrar os sinais de uma vida antiga no planeta, quando esteve em condições mais amenas do que as atuais.

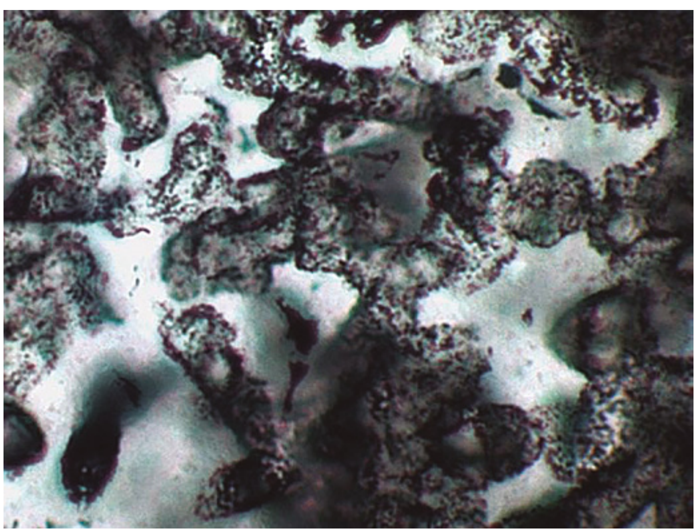


Figura 1.3. Alguns dos fósseis mais antigos da Terra, encontrados na região de Pilbara, no oeste da Austrália, de bactérias que viviam em uma época na qual não existia oxigênio na atmosfera (cerca de 3,4 bilhões de anos atrás). Talvez, se encontrarmos sinais de vida em Marte, eles sejam parecidos com esses microfósseis. Fonte: D. Wacey/UWA

Vida em ambientes extremos da Terra

O Universo é um lugar de extremos – muito frio ou muito quente, ausência de água, forte incidência de radiação, condições químicas adversas, como pH alto ou baixo ou mesmo a presença de elementos tóxicos (Figura 1.4). Para compreender os tipos de organismo



Frio



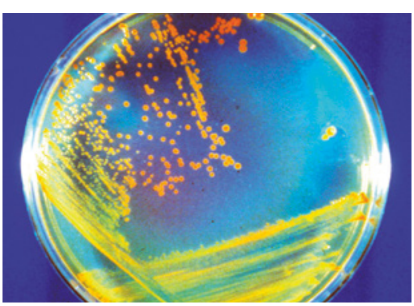
Seco



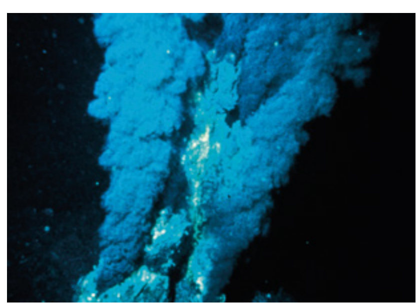
Ácido



Alcalino



Radiação



Alta Pressão

Figura 1.4. Alguns dos ambientes extremos de nosso planeta hoje – praticamente toda a superfície (até alguns quilômetros de profundidade) da Terra é habitada por micro-organismos, alguns fazendo uso de estratégias de sobrevivência muito peculiares. Fonte: Shutterstock / Getty Images / Wikimedia Commons

capazes de sobreviver e mesmo crescer sob essas condições (e quais seus mecanismos biológicos adaptados para isso), os astrobiólogos estudam na Terra ambientes análogos aos extraterrestres, usando-os como modelo, por meio da microbiologia ambiental e de experimentos em laboratório, levando os micro-organismos terrestres a condições simuladas, por exemplo, da superfície marciana. O mesmo é válido para compreendermos as condições de vida da Terra primitiva, muito diferentes de nosso planeta atualmente.

Busca de vida fora da Terra: no Sistema Solar e além

Uma das grandes curiosidades da humanidade diz respeito à possibilidade de vida fora da Terra, e a astrobiologia utiliza ferramentas e métodos da ciência moderna para tentar não apenas detectar a presença de vida extraterrestre, mas também para entender seu funcionamento, sua origem e evolução. Será que toda forma de vida deve ser parecida com a de nosso planeta? Para isso, tenta-se entender como os planetas funcionam, procurando bons candidatos para abrigar vida, planetas com condições de habitabilidade. Da mesma maneira, o estudo da vida em ambientes extremos da Terra e o estudo da paleobiologia – a vida na Terra primitiva – fornece informações sobre qual a melhor forma de procurar sinais da presença de organismos vivos. E programas de busca de vida estão em andamento, seja em nosso Sistema Solar ou em exoplanetas.

Vida extraterrestre inteligente?

Se a existência de vida extraterrestre, de forma geral, já é um tema bastante intrigante à humanidade, a possibilidade de vida inteligente e com tecnologia para se comunicar tem ainda maior impacto. Apesar de a astrobiologia usar micro-organismos como seus principais modelos, diversos grupos procuram sinais de comunicação vindos do espaço, como, por exemplo, o projeto SETI (Busca por Inteligência Extraterrestre, na tradução para o português), que esquadrinha o Universo procurando sinais transmitidos por outras civilizações em rádio ou pulsos laser. Diferentemente

da ufologia, esses grupos fazem uso do método e rigor científicos na tentativa de responder a essa intrigante pergunta. Apesar de ser menos provável a existência de vida inteligente, tecnológica e comunicante do que a de micro-organismos, essas civilizações poderiam mandar sinais mais claros de sua existência e, portanto, seriam mais facilmente encontradas. Essa discussão normalmente vem acompanhada de implicações sociais, políticas e religiosas (Dick, 2007).

O futuro da vida

Atualmente, discute-se muito sobre mudança climática, aquecimento global e como a humanidade está alterando o planeta e quais as implicações em longo prazo (Figura 1.5). Em uma perspectiva mais ampla, a astrobiologia se propõe a entender como a vida se adapta às alterações do planeta com o tempo, seja em consequência das alterações produzidas pela própria vida, pelos fenômenos planetários (tectonismo, vulcanismo etc.), pela evolução da estrela hospedeira ou por outros fenômenos astrofísicos. Entender quais são esses possíveis fenômenos, quais suas interconexões, quais as consequências para o planeta e para a vida é de extremo interesse da ciência, mas também tem aplicações práticas, pois pode permitir maior controle do impacto humano sobre a Terra, minimizando os efeitos deletérios.

O futuro da astrobiologia – uma nova ciência?

Ainda é uma discussão se a astrobiologia evoluirá para se tornar uma ciência como definida do ponto de vista epistemológico. No entanto, é inegável que, apesar dos poucos anos de existência, a astrobiologia se mostrou capaz de produzir resultados científicos importantes. Diversas pesquisas, claramente feitas com motivação e enfoque astrobiológicos, são reconhecidas pela comunidade acadêmica, por exemplo, pelas publicações em revistas científicas de grande impacto, como *Nature* e *Science*. Cada vez mais pesquisadores têm se definido como astrobiólogos, e será apenas uma questão de tempo para sabermos se a

área irá se consolidar como ciência ou não. De uma forma ou de outra, resultados de importância científica estão sendo produzidos nesse processo, o que já pode definir essa atividade como válida. Além disso, seu grande apelo popular tem o potencial para engajar o público na ciência, encorajando muitos jovens a seguirem a carreira acadêmica, o que, por si só, já é uma contribuição significativa.

Astrobiologia no Brasil

Surgindo em seu formato atual na Nasa, em 1998, a astrobiologia começou a dar sinais no Brasil no início dos anos 2000 (Rodrigues, 2012). Mas, muito antes disso, pesquisadores brasileiros já estavam envolvidos com alguns dos temas que foram posteriormente compilados na astrobiologia.

Desde os anos 1980, pesquisas em química prebiótica e origem da vida, por exemplo, vêm sendo conduzidas, tendo como pioneiro Ricardo C. Ferreira, que foi professor do Departamento de Química da Universidade Federal de Pernambuco.

A busca de vida fora da Terra foi estudada, do ponto de vista histórico, por Eduardo Dorneles Barcelos, em seu mestrado e doutorado na Universidade de São Paulo, sob orientação do professor Shozo Motoyama, no final da década de 1980 e início da de 1990 (Barcelos, 2001).

Antes disso, em 1958, o biólogo Flávio Pereira, formado em História Natural pela Universidade de São Paulo e professor do ensino médio, havia escrito seu livro intitulado *Introdução à astrobiologia*, em que compilava grande parte do que se acreditava na época sobre a existência de vida fora da Terra (Pereira, 1958). Escrito antes das missões de exploração espacial, quando não havia uma separação clara entre astrobiologia e ufologia, o livro traz conceitos até hoje discutidos pela astrobiologia, porém misturados a temas hoje considerados menos científicos, como a descrição de habitantes de outros planetas. Pereira tornou-se, posteriormente, pioneiro da ufologia no país, distanciando-se do enfoque da astrobiologia moderna.



Figura 1.5. Um planeta em constante evolução – a Terra vem passando por mudanças de temperatura, composição química da atmosfera e dos oceanos, radiação solar. Como essas alterações mudam a vida do planeta e como a vida responde e interfere na evolução do próprio planeta? Como isso definirá o futuro da vida? Projeto e supervisão: Augusto Damineli / Ilustração: Paulo Roberto F. Santiago

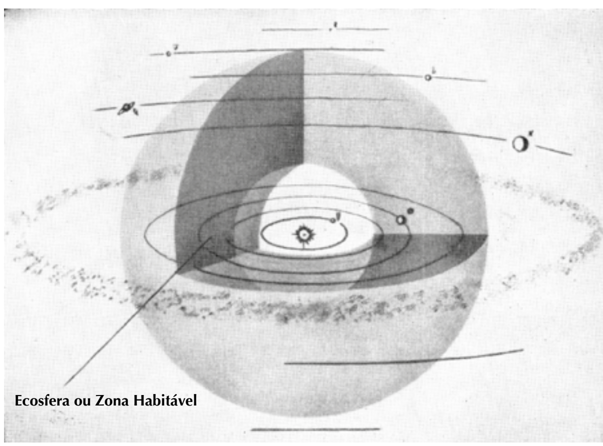


Figura 1.6. Representação gráfica da "ecosfera", termo equivalente ao que hoje chamamos de "zona de habitabilidade estelar", apresentado por Flávio Pereira em seu livro *Introdução à astrobiologia*. Fonte: *The Journal of Astronautics,* Summer, 1956

A astrobiologia começou a se institucionalizar no Brasil a partir de 2006, com a organização do I Workshop Brasileiro de Astrobiologia, que reuniu pesquisadores de diferentes áreas de atuação e permitiu a criação dos primeiros grupos de pesquisa interdisciplinares na área. Se antes as pesquisas em astrobiologia

eram feitas isoladamente, após esse encontro, iniciou-se uma colaboração mais efetiva e uma formalização de um grupo de pesquisadores trabalhando na área em conjunto (Rodrigues et al., 2012).

Diversos projetos de pesquisa foram criados após essa data, e, em 2009 e 2010, os primeiros doutorados tendo astrobiologia como tema central foram defendidos por Douglas Galante (2009), em astronomia (USP), e Ivan Paulino-Lima (2010), em biologia (UFRJ). Em 2010 foi iniciada a instalação do Laboratório de Astrobiologia, ou simplesmente AstroLab, na Universidade de São Paulo, em um esforço conjunto de pesquisadores de vários institutos e universidades para estudar a biodiversidade de nosso planeta e compreender suas conexões com os sistemas planetários, astronômicos e avançar no entendimento do fenômeno da vida no Universo. Um dos principais equipamentos desenvolvidos pelos pesquisadores brasileiros é uma câmara capaz de simular ambientes espaciais e planetários, permitindo diversos estudos dentro da área de astrobiologia e ciências planetárias. O laboratório teve financiamento de diferentes fontes, tais como Programa Antártico Brasileiro (Proantar – CNPq), a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) e o Instituto Nacional de Estudos do Espaço (INEspaço) (Rodrigues et al., 2012).

Em 2011, esse laboratório ganhou um grande impulso com a criação do Núcleo de Pesquisa em Astrobiologia (NAP-Astrobio), financiado principalmente pela Universidade de São Paulo e da FAPESP, permitindo, por exemplo, que fosse realizada a primeira Escola Internacional de astrobiologia no país (Spasa, 2011), com participantes de todo o mundo, além de possibilitar que o grupo de pesquisa pudesse se associar como parceiro internacional do Instituto de Astrobiologia da Nasa (NAI), além da Rede Europeia de Associações de Astrobiologia (EANA). Esses esforços estão permitindo que o Brasil se torne um importante e atuante membro da comunidade científica internacional em Astrobiologia, com o intercâmbio de alunos, pesquisadores e conhecimento, garantindo, com o tempo, a fixação da astrobiologia como uma área de pesquisa científica reconhecida e capaz de produzir resultados de

interesse acadêmico e social. A soma desses esforços coloca os pesquisadores brasileiros, cada vez mais, em condições de contribuir firmemente para responder algumas das questões mais básicas da humanidade sobre a vida e o nosso lugar no Universo.

Referências

BARCELOS, E. D. *Telegramas para Marte* – a busca científica de vida e inteligência extraterrestre. São Paulo: Jorge Zahar, 2001.

BLUMBERG, B. S. The Nasa astrobiology institute: early history and organization. *Astrobiology*, v. 3, n. 3, p. 463-470, 2003.

CROWE, M. J. A history of the extraterrestrial life debate. *Zygon*, v. 2, n. 2, p. 16, 1997.

DES MARAIS et al. The Nasa Astrobiology Roadmap. *Astrobiology*, v. 8, n. 4, p. 715-730

DES MARAIS , D. J.; WALTER, M. R. Astrobiology: exploring the origins, evolution, and distribution of life in the universe. *Annual Review of Ecology and Systematics*, n. 30, p. 397-420, 1999.

DICK, S. J. Origins of the extraterrestrial life debate and its relation to the scientific revolution. *Journal of the History of Ideas*, v. 41, n. 1, p. 3-27, 1980.

______. Cultural aspects of astrobiology: a preliminary reconnaissance at the turn of the millennium. In: *Bioastronomy "99: a new era in bioastronomy*, p. 649-659. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2000.

______. Cultural evolution and SETI. *Astrobiology*, v. 7, n. 3, p. 509-510, 2007.

______. Origins and development of Nasa's exobiology program, 1958-1976. *Acta Astronautica*, v. 65, n. 1-2, p. 1-5, 2009.

______. *Plurality of worlds*: the origins of the extraterrestrial life debate from Democritus to Kant. Cambridge Cambridgeshire; New York: Cambridge University Press, 246 p, 1982.

Galante, D. *Efeitos astrofísicos e astrobiológicos de Gamma-Ray Bursts*. São Paulo, 2009. 185 p. (Doutorado em Astronomia) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo.

Mix, L. J. et al. The astrobiology primer: an outline of general knowledge. *Astrobiology*, v. 6, n. 5, p. 735-813, 2006.

Paulino-lima, I. G. *Investigação das condições de sobrevivência de microrganismos extremófilos em ambientes extraterrestres simulados*, 2010. 256 p. (Doutorado) – Instituto de Biofísica Carlos Chagas Filho, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2010.

Pereira, F. A. *Introdução à astrobiologia*. São Paulo: José Olympio Editora, São Paulo, 1958.

Phillips, C. *Space exploration for dummies*. Indianapolis: Wiley Pub. Inc., 2009.

Rodrigues, F. et al. Astrobiology in Brazil: early history and perspectives. *International Journal of Astrobiology*, 2012, v. 11, n. 4, p. 189-202, 2012.

A ORIGEM DOS ELEMENTOS

Capítulo 2

Roberto D. Dias da Costa e Jorge Ernesto Horvath

Formação do Universo e nucleossíntese primordial

Origem do Universo

A curiosidade fundamental de saber de onde viemos intriga a humanidade desde a aurora da civilização. Todos os povos da antiguidade tinham seus mitos cosmogônicos que descreviam a criação do mundo, mas foi apenas com a evolução das ideias da física no início do século XX, em particular com a elaboração da teoria da relatividade geral por Albert Einstein (com ilustres predecessores como Newton), que foi possível formular uma teoria que descrevesse a origem e a evolução do Universo tal como as compreendemos hoje.

Ao longo do último século, a base teórica da relatividade, combinada com a física nuclear e a física de partículas elementares, permitiu a interpretação correta de resultados experimentais de distintas origens, tais como a datação de rochas e de meteoritos,

a composição química do Sol e das estrelas e a expansão do Universo. Juntos, esses resultados permitiram determinar a idade da Terra, do Sol e, finalmente, do próprio Universo. Hoje se sabe que, em certo momento, todo o conteúdo do Universo estava em um estado muito denso e quente que se expandiu subitamente. É este processo de expansão rápida que se denomina "Big Bang" e marca o surgimento do Universo como o conhecemos e ocorreu há cerca de 13,7 bilhões de anos. Desde então, o Universo continua a se expandir e a esfriar, já de forma bastante análoga a um balão com gás, onde as leis de conservação forçam a queda da temperatura conforme aumenta o volume do recipiente.

Existem *evidências* observacionais muito fortes que confirmam essa teoria, as mais importantes são a expansão propriamente dita, a chamada "radiação cósmica de fundo", e as abundâncias de hélio, lítio e deutério (estas últimas bem mais sensíveis à expansão) medidas em estrelas de distintas idades. A expansão do Universo é uma das possíveis soluções matemáticas da teoria da relatividade e foi comprovada nos anos 1920 através de observações astronômicas, atribuídas inicialmente a Hubble e Humason, e depois confirmadas e refinadas por muitos grupos independentes. Na verdade, os modelos mais favorecidos são os chamados *modelos de Friedmann,* dado que admitem a expansão, embora o próprio Einstein os rejeitasse veementemente antes dos trabalhos de Hubble. Atualmente existem medidas muito precisas da taxa de expansão do Universo, e os resultados são fundamentais para testes e validação das teorias cosmológicas modernas. Entre essas relíquias cosmológicas, o tênue "brilho" do céu detectado na região das micro-ondas, a chamada *radiação cósmica de fundo,* representa o que "sobrou" na forma de energia nos estágios iniciais do Universo, quando os átomos estáveis se formaram a partir do esfriamento da radiação de alta energia que originalmente preenchia todo o volume do Universo, no processo de conversão de energia em matéria descrito pela conhecida expressão da relatividade $E=mc^2$. Sua detecção, em 1964, proporcionou uma das mais sólidas evidências da validade da teoria do Big Bang, já que

na cosmologia do Big Bang existe fatalmente um instante no qual a radiação escapa livremente. Esse momento acontece quando a radiação desacopla da matéria, ou seja, a taxa de interação dos fótons com ela se torna pequena, e as distâncias médias entre uma interação e outra se tornam muito grandes. O momento do desacoplamento coincide com o da recombinação de íons e elétrons e com a formação dos átomos neutros, que é possível com a diminuição da temperatura média para cerca de 3.000 K. A menor densidade eletrônica diminui as taxas de espalhamento Compton de fótons sobre elétrons, permitindo que a luz agora possa viajar distâncias comparáveis com o raio do Universo, o qual se torna, efetivamente, transparente à radiação eletromagnética.

Já a determinação das abundâncias de hélio, deutério e lítio servem como termômetro de uma época anterior, a chamada era da nucleossíntese primordial, quando a temperatura em queda permitiu a "montagem" dos núcleos a partir dos prótons e nêutrons livres. Em particular, nas estrelas mais antigas, a determinação do hélio fornece uma indicação clara de que parte dele não foi fabricada pelos processos de nucleossíntese estelar, mas durante a nucleossíntese primordial, nas fases iniciais de existência do Universo.

Formação dos prótons, nêutrons e partículas elementares

As fases mais primordiais do próprio Big Bang são ainda motivo de muita discussão. Acredita-se que quando o Universo tinha meros 10^{-37} segundos* de existência houve uma fase de rapidíssima expansão do seu volume, com consequente diminuição na densidade e na temperatura, um processo denominado "inflação cósmica". Ao final desse período, a densidade de energia havia baixado o suficiente para que as partículas elementares fossem injetadas a partir do decaimento do vácuo (que originalmente

* Notação exponencial: 10^{-1} significa 0,1; 10^{-2} significa 0,01; 10^{-3} significa 0,001 e assim sucessivamente. Portanto, 10^{-37} significa 0,000...0001 com 36 zeros depois da vírgula, antes do algarismo 1. De forma análoga, $10^1 = 10$; $10^2 = 100$; $10^3 = 1000$; $10^6 = 1.000.000$ e assim por diante.

detinha essencialmente toda a energia do Universo): elétrons, múons, táons, neutrinos, quarks e suas respectivas antipartículas. Esse processo concluiu-se cerca de 10^{-11} segundos após o início do Big Bang. Antes desse momento, o Universo se encontrava em um domínio totalmente desconhecido, em que até a gravitação (geralmente ignorada nos processos de alta energia nos laboratórios) deve ter tido uma influência comparável às outras interações elementares. Nesse regime, a procura por teorias quânticas da gravitação domina a atividade dos físicos teóricos. Felizmente, a influência dessas incertezas no problema da origem dos elementos ocorrida quando o Universo era muitíssimo mais frio e velho não é grande, e poderemos ignorá-la em nossa discussão.

Com a progressiva expansão e o contínuo esfriamento, o ambiente do Universo primitivo tornou-se propício ao surgimento das partículas constituintes dos núcleos ordinários pela combinação de distintos tipos de quark. Assim, quando o Universo tinha 10^{-6} segundos de idade (e uma temperatura de 10^{13} K) formaram-se os prótons e nêutrons, "tijolos" que constituem todos os átomos. Esse instante na história do Universo é o primeiro no qual as componentes são "ordinárias", isto é, elétrons, neutrinos, múons, prótons e nêutrons são sujeitos à hierarquia de forças que conhecemos bem por serem estudadas nos laboratórios há pelo menos um século.

Nucleossíntese primordial: do hidrogênio ao berílio

Já demonstramos que, à medida que a evolução do Universo primitivo prosseguia, expandia-se o volume e caía a temperatura. Cerca de 3 minutos após o instante inicial, a temperatura havia caído para cerca de um bilhão de graus, baixa o suficiente para que nêutrons e prótons pudessem se combinar, iniciando, assim, a chamada *nucleossíntese primordial*. O primeiro núcleo mais pesado a ser sintetizado foi o deutério, um isótopo de hidrogênio cujo núcleo tem um próton e um nêutron, sendo, porém, muito pouco estável. Deve-se notar, todavia, que a maioria dos prótons ficou livre, sem se combinar com nêutrons, e mais tarde dariam origem aos átomos de hidrogênio. A razão para isso é bastante simples:

pode-se calcular a densidade de ambos os núcleons usando as mesmas equações da química de laboratório. Assim, chega-se de imediato ao resultado da existência de 1 nêutron por cada 7 prótons no momento da nucleossíntese. Rapidamente, um nêutron e um próton se combinaram e praticamente a totalidade deles depois se combinou para formar hélio. Enquanto isso, 6 de cada 7 prótons ficaram sem emparelhamento (dois prótons não podem se ligar; se pudessem, as estrelas não existiriam, já que a fusão de prótons acabaria com elas em tempos curtíssimos). Assim, 75% da nucleossíntese primordial deve ter formado hidrogênio, e 25% hélio (com frações pequenas de outros elementos). Essa predição das frações relativas baseada em princípios fundamentais é importante para justificar a confiança na cosmologia do Big Bang.

A sequência de reações de fusão nuclear continuou acontecendo à medida que o Universo se expandia e esfriava, surgindo, em seguida, os núcleos de hélio: a partir do deutério combinado com um próton, formaram-se os núcleos de ^{3}He, compostos de dois prótons e um nêutron, e dois núcleos de ^{3}He formaram ^{4}He (composto de dois prótons de dois nêutrons), liberando, nesse processo, dois prótons. A partir dos núcleos de deutério e de hélio, em princípio poderiam se formar elementos mais massivos, porém uma característica intrínseca dos núcleos atômicos atrapalhou essa sequência: não existem núcleos estáveis compostos por 5 ou 8 núcleons (ou seja, prótons e nêutrons). Em função disso, os elementos estáveis a serem criados em seguida foram o berílio e o lítio. O ^{7}Be é uma combinação de ^{3}He com ^{4}He, e, finalmente, o ^{7}Li é uma combinação do ^{7}Be com um elétron. Temos aqui uma predição espetacular do Big Bang: as reações de fusão pararam pelo efeito da expansão, já que os núcleos recém-criados não puderam encontrar "parceiros" para continuar e produzir ferro (o núcleo mais ligado). Assim, a fusão de elementos mais pesados foi impedida (chegando apenas até o lítio) por duas razões combinadas: a inexistência dos núcleos estáveis entre 5 e 8 núcleons e a expansão que diluiu a densidade e impediu que a fusão continuasse. Uma rede de cálculos detalhados confirma

o que acabamos de expor com grande precisão. Já haviam se passado cerca de 20 minutos desde o Big Bang.

A evolução do Universo prosseguiu daí em diante com a formação das grandes estruturas: com o prosseguimento da expansão, a matéria primordial, que nos instantes iniciais era estritamente homogênea, passou a acomodar-se onde pequenas irregularidades na densidade começaram a *crescer*, aumentando assim seu próprio potencial gravitacional. Mais matéria se aglomerando implicou ainda mais matéria caindo até se formarem grandes estruturas que deram origem aos aglomerados de galáxias e às galáxias individualmente. É dentro desse contexto que o Universo "acende" os primeiros fornos nucleares que permitem continuar a nucleossíntese até completar a tabela periódica: as estrelas.

Evolução estelar e formação dos elementos leves

Evolução das estrelas de massa pequena e intermediária

O critério de classificação das massas estelares é relativo ao Sol e as massas são expressas em relação à massa dele, que é de 2×10^{30} kg. Define-se como estrela de baixa massa aquela cuja massa está entre 0,08 e 0,8 vezes a massa do Sol, e como de massa intermediária aquelas que estão na faixa de 0,8 a 8 massas solares. Objetos com massas menores que 0,08 vezes a do Sol não são capazes de fazer fusão nuclear do hidrogênio e não contribuem, portanto, para a síntese dos elementos químicos. Já as estrelas com mais de 8 vezes a massa do Sol, as chamadas estrelas massivas, têm ciclo evolutivo distinto das demais, que termina com a explosão de uma supernova, como será visto mais adiante.

Dentro do contexto de explicar a origem dos elementos químicos, pouco precisa ser dito em relação às estrelas de baixa massa. Devido à lentidão de seu ciclo evolutivo, aquelas formadas logo que as próprias galáxias se formaram ainda estão na "sequência principal", fase na qual produzem energia pela fusão termonuclear de hidrogênio, que se transforma em hélio em um processo que libera grandes quantidades de energia.

Essas estrelas estão produzindo hélio, porém esse produto ainda está no seu núcleo; portanto, não contribui para a evolução química do meio interestelar e, consequentemente, das gerações sucessivas de estrelas.

O mecanismo mais comum de produção de energia na sequência principal é o chamado "ciclo próton-próton", descrito pela seguinte cadeia de reações nucleares (Figura 2.1):

$$p + p \rightarrow {}^{2}H + e^{+}\nu_{e}$$
$$p + {}^{2}H \rightarrow {}^{3}He + \gamma$$
$${}^{3}He + {}^{3}He \rightarrow {}^{4}He + p + p$$

Figura 2.1. Ciclo próton-próton. As duas primeiras reações ocorrem duas vezes. Tem-se, portanto, como entrada, 6 prótons; e, como saída, um núcleo de hélio, dois prótons, um pósitron, um neutrino e energia

Além do ciclo próton-próton, as estrelas também podem produzir energia pelo ciclo CNO, no qual átomos de carbono, nitrogênio e oxigênio já existentes no núcleo estelar atuam de forma análoga a catalisadores em reações químicas, sua composição não se altera ao longo da cadeia de reações. A figura abaixo mostra a cadeia de reações do ciclo CNO. Deve-se notar que o ciclo consome prótons e produz átomos de hélio, os demais elementos permanecem inalterados (Figura 2.2).

$${}^{12}C + p \rightarrow {}^{13}N + \gamma$$
$${}^{13}N \rightarrow {}^{13}C + e^{+} + \nu_{e}$$
$${}^{13}C + p \rightarrow {}^{14}N + \gamma$$
$${}^{14}N + p \rightarrow {}^{15}O + \gamma$$
$${}^{15}O \rightarrow {}^{15}N + e^{+} + \nu_{e}$$
$${}^{15}N + p \rightarrow {}^{12}C + {}^{4}He$$

Figura 2.2. Ciclo CNO. A sequência de reações usa núcleos de carbono preexistentes, produz temporariamente nitrogênio e oxigênio, porém ao final restitui-se o carbono inicial e os produtos são núcleos de hélio, pósitrons, neutrinos e energia

A evolução prossegue e, se a estrela tiver massa suficiente, ocorrerá a ignição do hélio no núcleo estelar, que sofrerá fusão nuclear transformando-se em carbono através do chamado "processo triplo-alfa", descrito pela reação:

$$3 \times {}^{4}He \rightarrow {}^{12}C + e^{+} + e^{-} + \gamma$$

Neste ponto é que podemos perceber como é notável a sequência de eventos da nucleossíntese para a vida, especialmente a humana. Já apontamos que a expansão do Universo impediu que um elemento como o carbono fosse sintetizado, porém a vida tal como a conhecemos seria impossível sem carbono. Assim, e dado que as estrelas são as únicas responsáveis pela grande quantidade de carbono existente no Universo, poderíamos pensar que a reação "triplo-alfa" ilustrada antes é relativamente simples e comum. Mas não é o caso: escrever "$3\times{}^{4}He$" é uma forma muito simplificada de dizer que essa reação de três corpos precisa de uma fusão inicial de *dois* hélios e tempo para um terceiro hélio se juntar a eles. Porém, o estado formado ${}^{8}Be$ é instável, embora sua vida seja longa o suficiente para permitir a existência de 1 núcleo de berílio por bilhão de núcleos de ${}^{4}He$. Mas ainda a reação com outro ${}^{4}He$ para formar ${}^{12}C$ é proibida pelas leis da mecânica quântica. Assim, o astrônomo inglês Fred Hoyle insistiu na existência de um estado excitado (de maior energia) do carbono, a partir do qual o carbono ordinário seria produzido por decaimento do primeiro. É importante destacar a audácia dessa proposta, baseada na abundância do carbono no Universo que, para Hoyle, era prova incontestável do canal de produção que ele imaginava. Esse estado foi medido pouco tempo depois, exatamente onde "devia" estar, e constatou-se que seu decaimento gama produz essencialmente todo o carbono do Universo. Abria-se o caminho para a compreensão dos ciclos nucleares superiores que dão origem à boa parte da tabela periódica e, posteriormente, à análise das explosões estelares decorrentes dessa evolução final.

Cadeias de reações nucleares e nucleossíntese estelar: do carbono ao ferro

O ciclo evolutivo de uma estrela prossegue em função de sua massa. Caso a estrela esteja isolada e sua massa não passar de 8 massas solares, o processo de nucleossíntese se encerra no carbono. Porém, se essas estrelas pertencerem a sistemas binários, é possível que troquem massa e, nos estágios finais desses sistemas, com a temperatura no núcleo estelar podendo subir até um bilhão de kelvins, uma cadeia de reações de nucleossíntese pode ocorrer. Essas reações baseiam-se na chamada “captura alfa”, ou seja, na captura de um núcleo de hélio (ou “partícula alfa”, como era chamado antigamente) por outro núcleo, ou então pela captura de nêutrons isolados, produzindo, assim, um elemento químico de massa atômica maior a partir de dois menores.

Esses processos se encerram ao serem sintetizados os elementos do grupo do ferro: ^{44}Sc, ^{48}Ti, ^{52}Cr, ^{56}Fe e outros que têm estrutura nuclear fortemente ligada, de modo a impedir a fabricação de núcleos mais pesados por fusão nuclear, pois deixa de ser exotérmica para núcleos mais pesados que estes.

Os mecanismos de enriquecimento do meio interestelar

É importante notar que os processos de nucleossíntese estelar não ocorrem em todo o corpo de uma estrela, mas apenas no seu núcleo, que é uma fração muito pequena do volume total. No caso do Sol, por exemplo, o diâmetro total é de 1,4 milhões de km, porém o núcleo solar, onde está agora ocorrendo a fusão nuclear de hidrogênio responsável por toda a produção de energia, tem o diâmetro da Terra, cerca de 12 mil km. Isso é análogo para todas as estrelas: as espécies químicas produzidas por nucleossíntese ficam presas no núcleo estelar até a conclusão do ciclo evolutivo. Ao final do ciclo, distintos mecanismos podem levar à ejeção do material recentemente produzido para o meio interestelar, onde enriquecerá elementos químicos das futuras gerações de estrelas.

Quando uma estrela chega ao final do seu ciclo, contrai seu núcleo e expande seu volume até o ponto em que a superfície

estelar se afasta com tal velocidade do centro que a estrela perde todo o seu envoltório externo, ejetando uma "casca", restando apenas o antigo núcleo estelar, que agora se constitui em uma categoria muito particular de estrela, a anã branca. O antigo envoltório estelar se expande indefinidamente a acaba se diluindo no meio interestelar em uma escala de tempo relativamente pequena, entre 30 e 50 mil anos. Por razões históricas, esses envoltórios são chamados "nebulosas planetárias" – objetos ricos em elementos químicos produzidos por suas estrelas progenitoras.

O material produzido em um núcleo estelar é ejetado na forma de explosões, que podem ser oriundas de dois tipos básicos de eventos: as novas e as supernovas. As novas são explosões *superficiais* em estrelas pertencentes a sistemas binários, seguramente decorrentes do acúmulo de hidrogênio fornecido pela companheira binária que fusiona subitamente quando as condições são atingidas na base da camada acertada. Este pode ser um fenômeno recorrente: um mesmo sistema binário pode sofrer explosões periódicas e cada uma delas joga para o meio interestelar material quimicamente enriquecido na explosão e também nas estrelas progenitoras. Já uma supernova (seja do tipo II ou outros) é um fenômeno completamente distinto, resultante do colapso do núcleo de uma estrela massiva (com mais de oito massas solares), com a consequente ejeção explosiva de seu envoltório externo, e que jamais acontece de novo porque a estrela se desmancha no ato; ou também resultado de uma explosão termonuclear de uma anã branca (Tipo Ia). Novas e supernovas são fenômenos de natureza distinta, porém em ambos o material é ejetado em alta velocidade e se dispersa no meio interestelar, vindo também a enriquecê-lo.

Nucleossíntese interestelar: um caso muito particular

Apenas traços dos elementos químicos lítio, berílio e boro foram produzidos no Big Bang. Além disso, esses elementos não são produzidos nas estrelas, ao contrário, são destruídos nos interiores estelares pelos mesmos processos que levam à síntese dos demais elementos. A principal fonte para eles é um mecanismo

denominado "espalação", que ocorre no meio interestelar. Esse processo consiste na colisão de raios cósmicos contra os núcleos atômicos do material existente no meio interestelar. Raios cósmicos, apesar do termo, não são radiações eletromagnéticas, mas, sim, *partículas* que viajam em alta velocidade no disco galáctico. Eles se compõem de prótons, elétrons, núcleos de hélio e outros mais pesados que são acelerados pela explosão de supernovas ou por outros eventos de alta energia. Essas colisões têm energia suficiente para arrancar prótons e nêutrons do núcleo-alvo, produzindo, assim, distintos elementos. Esse tipo de processo não ocorre somente no meio interestelar, mas também na atmosfera da Terra e nos primeiros metros de profundidade da crosta terrestre.

A espalação é o processo responsável pela produção de praticamente todo o lítio, berílio e boro existentes, já que apenas uma fração do ^{7}Li e do ^{7}B foi produzida no Big Bang. O mecanismo de produção desses átomos é a fragmentação, pelos prótons de alta energia, de núcleos de carbono, nitrogênio e oxigênio existentes no meio interestelar, que constituem boa parte dos raios cósmicos.

Supernovas e formação dos elementos pesados

Evolução das estrelas massivas

Estrelas massivas, entendidas como aquelas cuja massa, no momento de sua formação, é no mínimo 8 vezes a do Sol, têm trajetórias evolutivas distintas daquelas de pequena massa, concluindo seu ciclo de existência com a explosão de uma supernova. Um evento que, mesmo sendo catastrófico, proporciona o surgimento de todos os elementos massivos da tabela periódica, com massas atômicas maiores que a do ferro. Essa fronteira de 8 massas solares, na verdade, é aproximada, o limite depende não apenas da massa, mas da composição química da estrela.

O primeiro ponto a destacar é que estrelas massivas têm ciclos evolutivos muito rápidos. Enquanto o Sol existirá como uma estrela da sequência principal por cerca de 10 bilhões de anos, uma estrela que tenha 25 massas solares terá um ciclo evolutivo de

aproximadamente 7 milhões de anos. Isso acontece porque, à medida que aumenta a massa de uma estrela, sua luminosidade aumenta muito mais, portanto, o combustível nuclear se esgota bem mais rápido. Poderíamos dizer que existe um "metabolismo estelar": a taxa de consumo (fusão) do combustível estelar aumenta muito com a massa da estrela e assim este se esgota antes, encurtando a vida estelar.

Tipos de supernova

Depois de passar milhões de anos fusionando hidrogênio, as estrelas ficam sem condições de continuar esse processo, em particular nas estrelas massivas. O chamado ciclo triplo-alfa do hélio começa antes do hidrogênio se exaurir totalmente. Existe, assim, uma modificação da estrutura estelar que leva à queima de hélio em carbono no centro, enquanto a fusão do hidrogênio continua em uma camada concêntrica. Outros ciclos nucleares disparam sucessivamente de forma análoga até a estrela finalizar com um caroço suportado pela pressão quântica dos elétrons (de longe, maior que a pressão do gás à qual estamos acostumados) que não dependem da temperatura mas da compressão.

Estudos detalhados mostram que as estrelas com 8 a 10 vezes a massa do Sol nunca chegam a ter temperaturas que permitam os ciclos mais avançados, e culminam com um caroço composto de oxigênio-neônio-magnésio que suporta exatamente uma massa de 1,37 vezes a massa do Sol. Ao ultrapassar esse limite, a pressão não é suficiente, e o caroço *implode*, ricocheteia e expulsa as camadas externas (mais de 6 massas solares) em um evento denominado supernova por captura eletrônica. Para um observador externo, esse evento será quase indistinguível do tipo comum de supernova (tipo II), no qual o caroço conseguiu avançar na evolução e acontece em estrelas de 10 até 25 ou mais massas solares.

Nesse último caso, quando o núcleo de uma estrela massiva, composto de ferro e elementos adjacentes, ultrapassar o chamado Limite de Chandrasekhar, equivalente a 1,44 massas solares, também a gravitação vence o limite de resistência da própria estrutura

interna dos núcleos atômicos, e o núcleo colapsa quase em queda livre. Toda a região nuclear, que tinha dimensões da ordem do diâmetro da Terra, colapsa para uma estrutura com 10 a 15 km de diâmetro em poucos segundos, dissolvendo os próprios núcleos e formando, assim, uma estrela de nêutrons. Esse processo desencadeia a explosão de uma supernova tipo II "tradicional", isto é, com caroço de ferro e não de O-Ne-Mg. Como consequência do colapso, a temperatura do núcleo chega a 100 bilhões de kelvins, e é produzida uma onda de choque que ejeta todo o volume da estrela além da beira do núcleo em grande velocidade. Existe um enorme grau de sofisticação nas simulações numéricas que calculam como acontece essa sequência de eventos, e atualmente as instabilidades hidrodinâmicas são finamente estudadas para revelar seu papel na explosão. Porém, em todos os casos, a onda de choque que varre as camadas além do núcleo é considerada responsável pela supernova. Essa potente onda de choque combinada com a grande quantidade de nêutrons liberada por ocasião do colapso desencadeia a *nucleossíntese explosiva*, o processo de formação dos elementos pesados que ocorre apenas por alguns minutos, durante as explosões de supernova.

Existe também outro caminho evolutivo totalmente diferente que pode levar uma estrela a explodir como supernova: o dos sistemas binários compostos por estrelas relativamente massivas muito próximas uma da outra, uma delas sendo uma anã branca, suportada pela mesma pressão quântica dos elétrons (quase como se fosse o caroço anterior, sem envelope). À medida que uma delas evolui, pode haver troca de massa entre elas até que a anã branca ultrapasse o limite de Chandrasekhar, e como a anã branca contém uma quantidade substancial de carbono, este pode ser fusionado em elementos próximos ao ferro. A liberação repentina de energia da fusão, que acontece em menos de um segundo, leva à ocorrência de uma supernova Tipo Ia, de origem termonuclear, e não como produto de um colapso. Nesses eventos também ocorre nucleossíntese, porém os elementos formados não são os mesmos de uma supernova tipo II, já que estão restritos aos números

atômicos 60 ou menores, como consequência da física dos processos termonucleares.

Nucleossíntese dos elementos pesados: do ferro ao urânio

A partir da formação dos núcleos de ferro, o processo de nucleossíntese tem uma característica distinta do que ocorria com os núcleos leves: como a fusão nuclear deixa de ser exotérmica depois dessas massas atômicas, a síntese dos elementos mais pesados deve ocorrer pela captura de nêutrons e não mais por fusão. Esses processos são divididos em dois grupos principais: os processos *s* e os processos *r*, nos quais o índice *s* significa a captura *lenta* de nêutrons (*slow*) e o *r* significa a captura *rápida*.

O "processo *s*" ocorre em ambientes em que existam nêutrons livres, porém com densidade relativamente baixa, tipicamente nos núcleos de estrelas massivas. Nessas condições, um núcleo-semente pode capturar um nêutron e a seguir emitir um elétron, o que se chama *decaimento beta nuclear*, antes de capturar mais um nêutron. Esse mecanismo permite a formação de uma sequência de elementos químicos que vai do ^{57}Fe até o ^{209}Bi. A cadeia de reações abaixo ilustra uma fase desse processo:

$$^{56}\mathrm{Fe} + \mathrm{n} \rightarrow {}^{57}\mathrm{Fe}$$
$$^{57}\mathrm{Fe} + \mathrm{n} \rightarrow {}^{58}\mathrm{Fe}$$
$$^{58}\mathrm{Fe} + \mathrm{n} \rightarrow {}^{59}\mathrm{Fe} \rightarrow {}^{59}\mathrm{Co} + e^-$$
$$^{59}\mathrm{Co} + \mathrm{n} \rightarrow {}^{60}\mathrm{Co} \rightarrow {}^{60}\mathrm{Ni} + e^-$$

Esse tipo de processo pode prosseguir até a síntese do ^{209}Bi. Todas as reações seguintes resultam em isótopos instáveis que decaem novamente no bismuto. Assim, os elementos radioativos de grande massa, tais como tório ou urânio não podem, pela natureza do processo *s*, ser produzidos por esse caminho. A nucleossíntese dos elementos naturais mais massivos requer uma fonte muito mais abundante de nêutrons, de modo que sucessivos deles sejam capturados pelo núcleo-semente *antes* que ocorra um

decaimento beta nuclear, ou seja, a emissão de um elétron pelo núcleo atômico. Esse ambiente precisa de uma altíssima densidade de nêutrons e ocorre *durante* a explosão de uma supernova, consistindo no processo de captura rápida de nêutrons, ou "processo *r*". Assim, podemos dizer que o processo *r* resume-se em "engasgar" os núcleos para fazê-los capturar sequencialmente um grande número de nêutrons. Um esquema do funcionamento de ambos os processos *s* e *r* é mostrado na Figura 2.3.

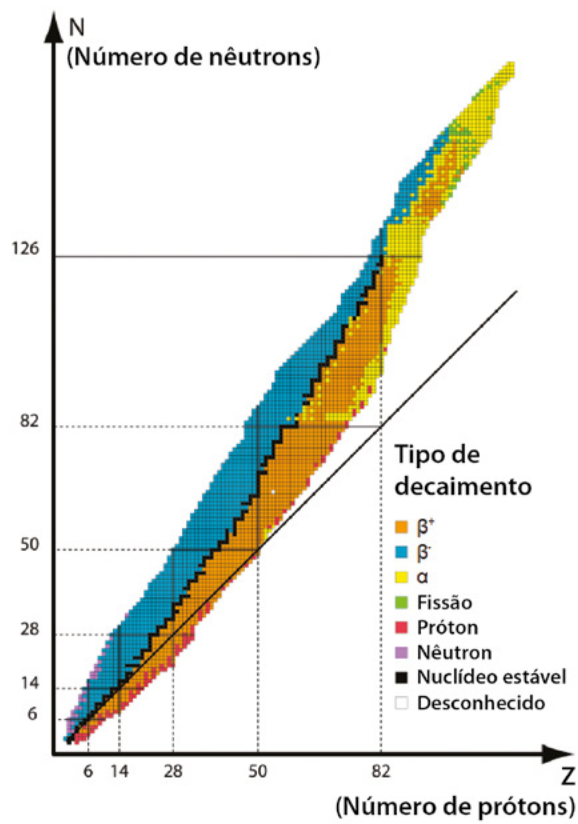


Figura 2.3. Os caminhos dos processo *s* e *r* na tabela periódica. Enquanto a captura lenta de nêutrons provoca a formação de núcleos progressivamente mais pesados ao longo de condições próximas à estabilidade, o processo *r* resulta em nuclídeos longe da estabilidade (povoando a parte inferior). Essa diferença poderia ser descrita dizendo que o processo *s* é o "herdeiro natural" ou continuador da obra da nucleossíntese estelar ordinária. Fonte: Wikimedia Commons

Durante os 15 primeiros minutos que se seguem ao colapso do núcleo de uma estrela massiva e à resultante explosão de uma supernova, a densidade de nêutrons livres é tão grande que permite a formação de configurações nucleares estáveis mais pesadas. É assim que se formam os elementos naturais mais pesados, bem como outros de massa atômica menor, porém cujas configurações nucleares requerem um grande fluxo de nêutrons para serem formadas. Por sua origem, esses processos são chamados de "nucleossíntese explosiva" e podem ocorrer não apenas nas supernovas, mas também nas novas, que, como dito antes, são explosões restritas à superfície de estrelas em sistemas binários.

As abundâncias químicas no Universo resultam do conjunto de todos os processos de nucleossíntese: a primordial, a estelar, a explosiva e a interestelar. Assim sendo, o meio interestelar se nutre de todos eles. Quando combinados, esses processos resultam em uma distribuição de abundância de elementos que pode ser verificada de distintas maneiras: nos meteoritos aqui na Terra, nas estrelas como o Sol, nos aglomerados estelares, nas nebulosas ou mesmo em galáxias inteiras. Distintos ambientes e histórias vão resultar em abundâncias relativas diferentes: a Terra, por exemplo, tem uma abundância de óxidos e silicatos muito maior que Júpiter ou Saturno, cuja composição é muito semelhante à do Sol e onde o hidrogênio e o hélio predominam. Acredita-se que o processo de formação do Sistema Solar tenha produzido essa diferença, espalhando elementos leves para formar os planetas gigantes, enquanto os grãos de poeira mais pesados foram responsáveis pela composição dos chamados "planetas telúricos", rochosos e sem grande quantidade de hidrogênio e hélio. Esse é um exemplo de como é importante compreender qual sistema deve ser examinado: as abundâncias encontradas refletem não só a composição existente, mas também peculiaridades dos processos de formação, que são, em grande medida, independentes da nucleossíntese. Isso quer dizer, no contexto da astrobiologia, que se deve levar em conta uma série de fatores importantes para saber onde existiriam condições para que a vida surgisse e se

sustentasse a partir das abundâncias existentes de elementos passíveis de serem metabolizados e outros requerimentos biológicos. Estamos seguros de compreender como são sintetizados os elementos alfa, fundamentais para a vida (fundamentalmente carbono, mas também oxigênio, magnésio e até ferro, nitrogênio, entre outros), enquanto os elementos mais pesados ainda apresentam desafios importantes. Podemos dizer, no entanto, que estamos nos primórdios do estudo da conexão entre a evolução química do universo e o desenvolvimento da vida. É importante observar que a biologia aproveita elementos bastante raros na natureza (por exemplo, o fósforo) e não segue o padrão de abundâncias cósmico. Mesmo assim, as estrelas são o elemento fundamental sem o qual não haveria em absoluto seres vivos tais como os que conhecemos (Figura 2.4).

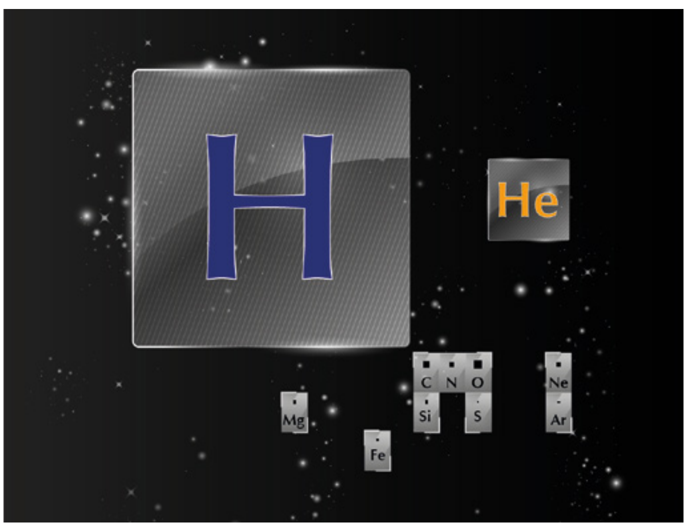


Figura 2.4. A tabela periódica do astrônomo. Contrariamente à representação convencional, o espaço de cada elemento é mostrado proporcionalmente à abundância cósmica medida. Note-se que todos os elementos alfa etc. não chegam, somados, a 1% do total. E outros – tão raros que nem aparecem na figura – são utilizados muito intensivamente pelos sistemas biológicos. Fonte: IAG

ASTROQUÍMICA

A formação, a destruição e a busca de moléculas prebióticas no espaço

Capítulo 3

Heloisa M. Boechat-Roberty

A astroquímica é uma ciência experimental, teórica e observacional que objetiva investigar a formação, a destruição e a busca de moléculas em diversos ambientes astronômicos, sendo fundamental para a compreensão dos processos que levam à origem, evolução e distribuição da vida na Galáxia. Uma das questões mais instigantes é a conexão entre a química interestelar e circunstelar, desde a formação de moléculas simples a partir de átomos até a complexidade extrema das moléculas biológicas.

A química nas fases da vida de estrelas

O espaço entre as estrelas é preenchido com grandes nuvens, chamadas de *nuvens moleculares*, constituídas de gás atômico, gás molecular (H_2, CO, NH_3 etc.), poeira interestelar e gelos. No meio interestelar, o átomo de hidrogênio (H) é o mais abundante. Por exemplo, para cada átomo de carbono (C), temos aproximadamente 10 mil átomos de H. Os grãos de poeira cósmica podem ser compostos de silício (silicatos) ou de carbono como o diamante, o grafite, o carbono amorfo e os hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs ou PAHs, na sigla em inglês).

Essas nuvens moleculares gigantes fragmentam-se em nuvens de diversos tamanhos, que entram em colapso gravitacional dando origem a estrelas de baixas, médias e altas massas. Na Figura 3.1, apresentamos uma imagem, obtida pelo telescópio espacial *Hubble*, de uma região de formação estelar, IC 2944, situada na constelação de Centauro, contendo nuvens escuras de vários tamanhos e formas que bloqueiam a luz das estrelas. A gravidade comprime violentamente a matéria, aumentando consideravelmente a densidade (partículas por unidade de volume), e a temperatura, levando à fusão de núcleos de H e à formação de elementos químicos mais pesados. Cada estrela pode ser considerada como uma fábrica de elementos químicos que, no final de sua vida, expele-os, enriquecendo o meio interestelar com átomos mais pesados que irão reagir e formar moléculas mais complexas.

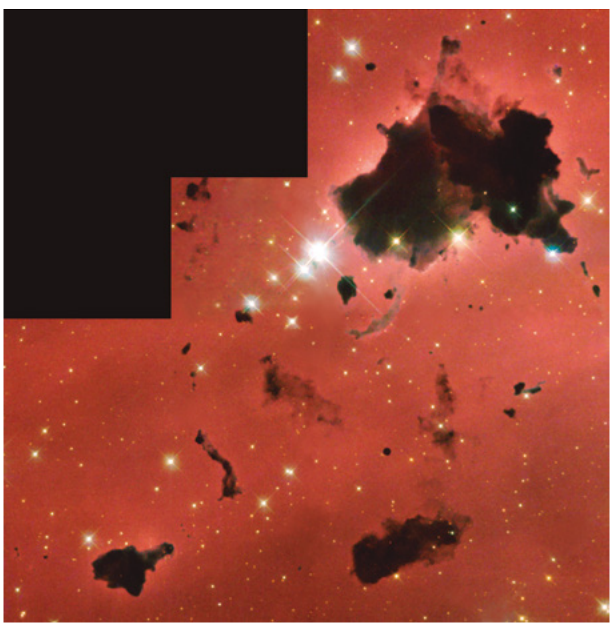


Figura 3.1. Glóbulos de Bok e nuvens escuras de diferentes tamanhos, compostas de gás e grãos de poeira que estão ou irão entrar no processo de colapso gravitacional, dando origem a estrelas de diferentes massas. Observa-se que as duas nuvens sobrepostas bloqueiam a luz. Fonte: Nasa e The Hubble Heritage Team (STSCI/AURA)

Discos protoplanetários

Uma importante fase da vida de uma estrela, como o Sol, é quando a estrela recém-nascida continua a sugar a matéria circundante, levando à formação de um disco espesso de gás e grãos. Esses discos são regiões de formação planetária, chamados de discos protoplanetários. Os ambientes que circundam as estrelas recém-nascidas e as estrelas evoluídas são considerados verdadeiros laboratórios químicos, onde ocorrem reações químicas formando compostos orgânicos e inorgânicos.

Na Figura 3.2 mostramos o esboço de um disco protoplanetário dividido em regiões de acordo com a densidade e temperatura. R é a distância radial da estrela central, e Z é a altura em relação ao plano do disco, dada em unidades astronômica (UA). A região no plano do disco é mais densa e mais fria, onde a radiação da estrela central e a radiação interestelar não conseguem penetrar. À medida que Z aumenta, a temperatura aumenta e a densidade de matéria diminui. As partes do disco mais expostas ao campo de radiação tornam-se extremamente quentes e totalmente ionizadas, dando origem às regiões ionizadas chamadas de regiões HII (HI e HII referem-se ao átomo de hidrogênio neutro e ionizado, respectivamente). Após essa frente ionizada, a temperatura é mais baixa, e a matéria está mais protegida da radiação, pois está mais distante da estrela central. No entanto, como os fótons de UV e raios X conseguem penetrar mais profundamente sem serem absorvidos, as moléculas podem ser dissociadas e temos as chamadas regiões de fotodissociação (PDRs, na sigla em inglês).

A interação da radiação eletromagnética, na faixa do ultravioleta (UV) e raios X, emitida pela estrela recém-formada, com o gás e poeira circundante, induz a ionização (elétrons são arrancados dos átomos e das moléculas) e a dissociação (quebra das moléculas). Os radicais e íons gerados por esses processos reagem quimicamente formando novas e mais complexas moléculas. Espécies neutras e ionizadas têm sido detectadas em vários discos protoplanetários como CO, CO_2, CN, HCN, HNC, H_2CO, C_2H, C_2H_2, CS, OH, HCO^+, $H^{13}CO^+$, DCO^+, N_2H^+ e vapor de água (Andrade, Rocco e Boechat-Roberty, 2010).

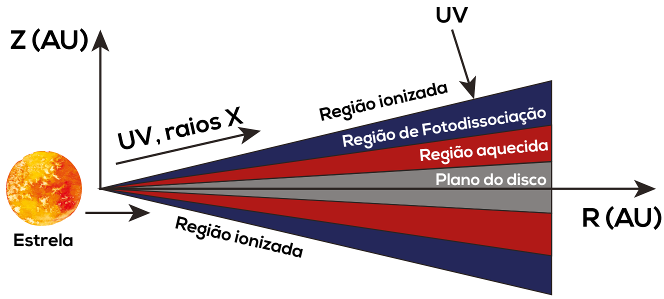


Figura 3.2. Esquema de um disco protoplanetário em corte transversal, exibindo a região de ionização exposta diretamente à radiação da estrela central e a região de fotodissociação, onde as moléculas estão mais protegidas, mas sofrem a dissociação pelos fótons de UV e raios X. Fonte: IAG

Nebulosas planetárias

No final da vida de uma estrela semelhante ao Sol, as camadas externas são ejetadas para o meio interestelar, tornando-se então uma nebulosa protoplanetária ou pré-planetária, que depois evoluirá para nebulosa planetária. Nesses ambientes circunstelares ocorrem diversas reações químicas entre espécies na fase gasosa e entre espécies congeladas na superfície de grãos.

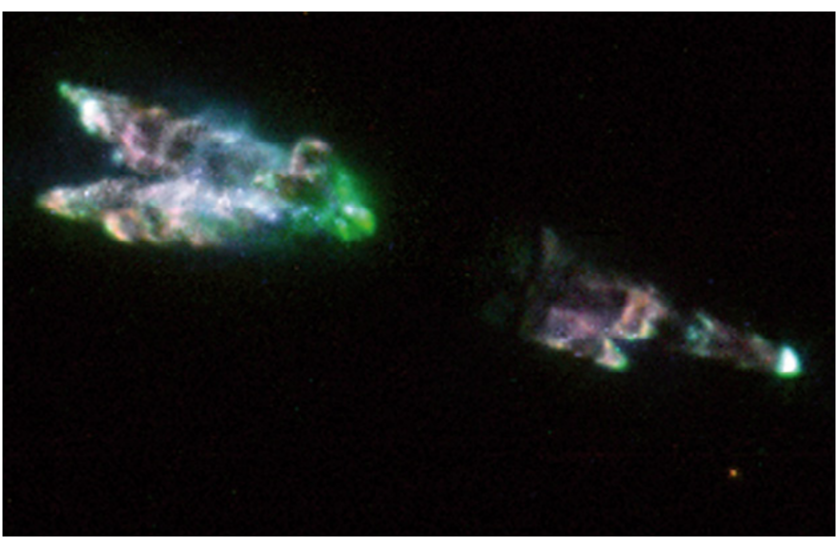


Figura 3.3. Nebulosa pré-planetária CRL 618 – detecção da molécula benzeno. Fonte: ESA & A.G.G.M. Tielens (SRON/Kapteyn Astronomical Institute)

CRL 618 é um exemplo de uma nebulosa pré-planetária mostrada na imagem obtida pelo telescópio espacial *Hubble* (Figura 3.3). Nesse objeto foi confirmada a presença de diversos hidrocarbonetos, C_4H_2, C_6H_2, e a importante molécula orgânica, benzeno C_6H_6, que é a unidade básica dos hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (PAHS) (Cernicharo, 2001).

Os PAHS são compostos orgânicos contendo dois ou mais anéis aromáticos (como o benzeno), unidos por um par de átomos de carbono compartilhado entre os anéis (Figura 3.4). Esses compostos são formados nas atmosferas de estrelas evoluídas pela polimerização de hidrocarbonetos, como o acetileno (C_2H_2).

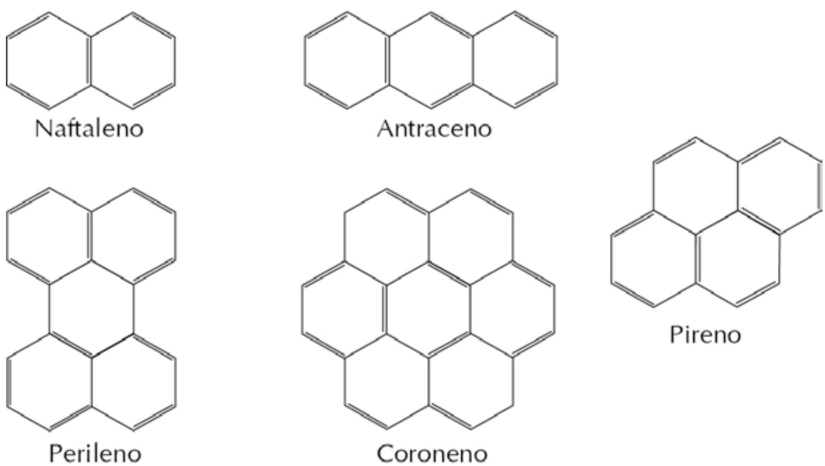


Figura 3.4. Alguns exemplos de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (PAHS)

Formação e destruição de moléculas

A abundância de uma dada espécie molecular depende das taxas de formação, de destruição (dissociação) e também da de dessorção do manto de gelo.

A formação de moléculas orgânicas ocorre tanto na fase gasosa quanto na fase sólida (no gelo). Em baixas temperaturas, moléculas como água (H_2O), amônia (NH_3), monóxido de carbono (CO) e metano (CH_4) são congeladas na superfície de grãos de poeira formando um manto de gelo.

A interação da radiação UV, raios X e de partículas carregadas como elétrons e prótons com as moléculas favorece as reações químicas. Por exemplo, os fragmentos gerados pela fotodissociação da amônia ($NH_3 + h\nu \rightarrow NH_2 + H$) e da fotodissociação do metano ($CH_4 + h\nu \rightarrow CH_3 + H$) podem reagir formando o composto orgânico, a metilamina (CH_3NH_2). Assim, diversas espécies são formadas por causa das muitas possíveis combinações.

A interação de fótons com a superfície de grãos de poeira, além de induzir a ionização e a dissociação das moléculas congeladas, também leva ao processo de fotodessorção de espécies neutras ou ionizadas da superfície. Esse processo faz que as moléculas retornem à fase gasosa, aumentado a abundância.

Na Tabela 3.1, mostramos as possíveis reações que ocorrem no meio interestelar e em ambientes circunstelares. Cada reação química tem uma probabilidade de acontecer dada pela taxa de formação da espécie química. A taxa de formação de uma molécula C por causa da reação de espécies neutras A + B é muita mais baixa que a taxa de formação por uma espécie neutra e uma ionizada (A^+ B), isto é, a reação íon-molécula.

Tabela 3.1. Reações químicas e as taxas de formação em ordem de grandeza

	Reações Químicas	Taxas de Formação ($cm^3\ s^{-1}$)
Íon- molécula	$A^+ + B \rightarrow C + D^+$	$\sim 10^{-9}$
Recombinação Dissociativa	$AB^+ + e^- \rightarrow A + B$	$\sim 10^{-6}$
Neutro-neutro	$A + B \rightarrow C+$	$\sim 10^{-12}$-10^{-10}
Transferência de Carga	$A^+ + B \rightarrow A + B^+$	$\sim 10^{-9}$
Associação Radiativa	$A + B \rightarrow AB + h\nu$	$\sim 10^{-16}$-10^{-9}

A superfície irregular de grãos de poeira atua como catalisador para reações de hidrogenação (A + H), protonação ($A + H^+$) e oxigenação (A + O) entre espécies neutras, diminuindo a energia de ativação e aumentando a velocidade da reação (Tabela 3.2).

Tabela 3.2. Hidrogenação, protonação e oxigenação de átomos mais abundantes

Hidrogenação	Protonação	Oxigenação
$H \rightarrow H_2$	H_3+	CO
$O \rightarrow H_2O$	H_3O+	CO_2
$C \rightarrow CH_4$	$HCO+$	O_2
$N \rightarrow NH_3$	NH_4+	O_3
$S \rightarrow H_2S$	N_2H+	H_2O_2

A formação do formaldeído (H_2CO) e do metanol (CH_3OH), o mais simples dos álcoois, se dá pela reação de hidrogenação da molécula monóxido de carbono (CO), que é a segunda molécula mais abundante no meio interestelar depois do H_2.

1. Reação neutro-neutro

$$CO + H \rightarrow HCO + H \rightarrow H_2CO \rightarrow CH_3CO \rightarrow CH_3OH$$

A partir do formaldeído e do metanol, outras moléculas poderão ser formadas.

2. Fotoionização (um fóton hν arranca um elétron da molécula)

$$CH_3OH + h\nu \rightarrow CH_3OH^+ + e^- \text{ (fotoelétron)}$$

3. Fotodissociação ou fotodestruição

$$CH_3OH^+ \rightarrow CH_3O^+ + O$$

4. Reação íon-molécula

$$CH_3O^+ + H_2CO \rightarrow H_2COOCH_3^+ + h\nu$$

5. Recombinação dissociativa

Um elétron recombina com o íon molecular e dissocia gerando o formiato de metila:

$$H_2COOCH_3^+ + e^- \rightarrow HCOOCH_3 + H$$

Moléculas precursoras de aminoácidos

O formiato de metila ($HCOOCH_3$) é um isômero do ácido acético (CH_3COOH). Os isômeros são moléculas que têm os mesmos átomos, porém em posições diferentes. Um dado importante obtido pelas observações astronômicas é que o formiato de metila é muito mais abundante no meio interestelar que o ácido acético.

O ácido acético, o mais simples dos ácidos carboxílicos, é uma molécula precursora do aminoácido glicina, sendo que a detecção deste último (NH_2CH_2COOH) nas regiões de formação estelar SgrB2, Orion KL e W51 ainda não foi confirmada. No entanto, nesses mesmos ambientes foram detectadas as moléculas precursoras desse aminoácido, como a amônia, o ácido fórmico (HCOOH), o ácido acético, a acetonitrila (CH_3CN), a metilamina, indicando que esse e outros aminoácidos podem ser formados. Estudos sobre a destruição dos isômeros por raios X (Pilling; Santos; Boechat-Roberty, 2006; Fantuzzi et al., 2011) mostram que tanto o ácido acético como o formiato de metila são eficientemente destruídos pela radiação eletromagnética, e a alta abundância relativa deve-se à eficiência na formação dos compostos.

Astroquímica experimental

Estuda-se experimentalmente os mecanismos e condições de interação de fótons (ultravioleta, UV e raios X), elétrons e partículas carregadas com moléculas, na fase gasosa e fase condensada, presentes em ambientes circunstelares e interestelares, para se entender os processos que ocorrem nesses ambientes. Muitos experimentos de interação de fótons com moléculas têm sido realizados no Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS), usando feixe de fótons provenientes das linhas

toroidal grating monochromator (TGM) e *spherical grating monochromator* (SGM) empregando a técnica da espectrometria de massas de tempo de voo para identificar os íons gerados pela interação (Figura 3.5).



Figura 3.5. Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS). As linhas de luz são tangentes ao anel de armazenamento dos elétrons relativísticos, que perdem energia emitindo radiação eletromagnética. Fonte: Divulgação LNLS/CNPEM

Moléculas na fase gasosa

São determinados experimentalmente os valores absolutos da probabilidade de uma dada molécula sofrer a ionização ou a dissociação por UV e raios X, isto é, as seções de choque de fotoionização (σion (E)) e fotodissociação (σdiss (E)) em cm^2. Conhecendo o fluxo de fótons em função da energia (E) (fótons cm^{-2} s^{-1}), f(E), em um dado ambiente astronômico, podemos determinar a taxa de destruição k_{diss} (número de moléculas dissociadas por segundo) de uma dada molécula:

$$k_{diss} = \int_{E1}^{E2} \sigma_{diss}(E) f(E) dE (s^{-1}) \qquad [1]$$

O tempo de vida de uma molécula pode ser calculado por

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{k_{diss}}(s) \qquad [2]$$

Esses parâmetros foram determinados para várias moléculas, como o ácido acético em regiões de formação estelar (Pilling et al., 2006), o benzeno (C_6H_6) na nebulosa pré-planetária CRL 618 (Boechat-Roberty, 2009) e o formiato de metila no disco protoplanetário da estrela TW Hydra (Fantuzzi et al., 2011).

Moléculas na fase condensada

Pela simulação da interação de agentes ionizantes com moléculas orgânicas congeladas na superfície de grãos de poeira são determinados valores absolutos de rendimentos de dessorção Y por fótons (íons/fóton) de gelo de metanol (Andrade et al., 2010) e de gelo de pirimidina (Mendoza et al., 2014). Estudos da dessorção estimulada por elétrons Y (íons/impacto) mostram resultados importantes de gelo de metanol e etanol (Almeida et al., 2012; Bergantini et al., 2013; Ribeiro, 2014, 2015).

A TW Hydra é uma jovem estrela T Tauri (a uma distância de 56 pc da Terra) que possui um disco espesso de gás e poeira e, por causa do processo de acreção e de intensos campos magnéticos, é uma considerável fonte emissora de raios X. O ácido cianídrico (HCN) e o acetileno (C_2H_2), presentes nesse ambiente, podem reagir e formar moléculas prebióticas como a pirimidina ($C_4H_4N_2$), através das reações de polimerização (Mendoza et al., 2014). Pirimidina é uma precursora das bases nitrogenadas como uracil, timina e citosina, fundamentais na formação dos ácidos nucleicos (DNA e RNA), e consiste de um anel benzênico (C_6H_6) com dois átomos de nitrogênio substituindo dois grupos C-H (Figura 3.6). Acredita-se que muitas das moléculas precursoras das macromoléculas biológicas estavam presentes nos ambientes quando os planetas foram formados.

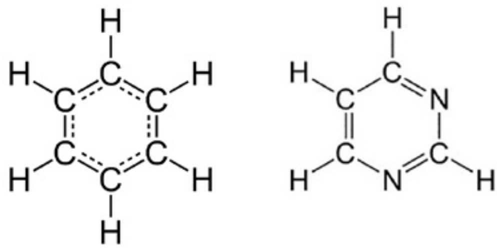


Figura 3.6. Benzeno e pirimidina, respectivamente.

Astroquímica observacional

A busca de moléculas no espaço é feita por observações astronômicas em vários comprimentos de onda. Muitas das moléculas foram descobertas através das observações em rádio e no infravermelho utilizando-se radiotelescópios como o Institut de Radioastronomie Millimétrique (Iram), de 30 metros, localizado na Espanha e telescópios espaciais, como o Infrared Space Observatory (ISO), o *Spitzer* e o mais recente observatório espacial *Herschel*. Recentemente entrou em operação o interferômetro Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (Alma), que consiste em um conjunto de muitas antenas de radiotelescópios instalados no deserto do Atacama no Chile, a 5 mil metros de altitude. A partir das observações, determinam-se parâmetros físicos e físico-químicos importantes sobre as regiões de interesse, como a temperatura e a densidade numérica dos gases, entre outros.

Uma grande quantidade de dados dos telescópios espaciais já é de domínio público e em breve novos dados também estarão disponíveis. A comunidade astronômica tem incentivado o uso desses dados, e é necessário um esforço conjunto para seu tratamento, pois a detecção das assinaturas moleculares não é simples. Para utilizar esses dados é preciso adquirir conhecimento e experiência em obter espectros desses bancos de dados e em manusear softwares de redução de dados, com o objetivo de identificar novas moléculas e íons moleculares em objetos de interesse.



Figura 3.7. Radiotelescópio Iram 30m, Pico Veleta, Espanha. Fonte: JuanJaén/ Creative Commons

Recentemente, Mendoza et al. (2014), usando dados do telescópio Iram 30m, dentro do programa *Astrochemical Surveys at Iram* (ASAI), identificaram e determinaram a abundância da molécula formamida (NH_2CHO) na protoestrela L1157-mm, que está a uma distância da Terra de cerca de 800 anos-luz. A formamida é um composto importante na síntese de aminoácidos e proteínas, essenciais para os organismos vivos.

Astroquímica teórica

Modelos teóricos são desenvolvidos na tentativa de se descrever diferentes cenários físico-químicos – por exemplo, a formação e evolução de moléculas em função do tempo em diversos ambientes interestelares e circunstelares, levando-se em conta, por exemplo, as condições físico-químicas de cada ambiente, a abundância inicial dos elementos químicos e as principais reações químicas.

A estrutura e a estabilidade de íons moleculares têm sido investigadas empregando métodos da química quântica para conhecer as espécies moleculares mais estáveis e suas contribuições para a química em ambientes astrofísicos (Fantuzzi et al., 2012).

Pelos modelos cinéticos de reações químicas de formação de moléculas em atmosferas de exoplanetas estima-se sua produção para alguns casos concretos como o do planeta HD209458b.

Referências

ALMEIDA, G. C. et al. Desorption from methanol and ethanol ices by high energy electrons: relevance to astrochemical models. *Journal of Physical Chemistry C,* v. 116, n. 48, p. 25388-25394, 2012.

ANDRADE, D. P. P.; ROCCO, M. L. M.; BOECHAT-ROBERTY, H. M. X-ray photodesorption from methanol ice. *Monthly Notices Royal Astronomical Society*, v. 409, n. 3, p. 1289-1296, 2010.

BERGANTINI, A. et al. Desorption from methanol ice induced by electrons from solar wind or magnetospheres. *Advances in Space Research*, v. 52, n. 6, p. 1201-1205, 2013.

BOECHAT-ROBERTY, H. M. et al. Dissociation of the benzene molecule by ultraviolet and soft X-rays in circumstellar environment. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 394, p. 810-817, 2009.

CERNICHARO, J. et al. Infrared space observatory's discovery of C_4H_2, C_6H_2 and benzene in CRL 618. *The Astrophysical Journal*, v. 546, p. L123-L126, 2001.

FANTUZZI, F. et al. Photodissociation of methyl formate in circumstellar environment: stability under soft X-rays. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society,* v. 417, n. 4, p. 2631-2641, 2011.

FANTUZZI, F. et al. Positive molecular ions and ion-neutral complexes in the gas phase: structure and stability of $C_2H_4O_2^{+\cdot}$ and $C_2H_4O_2^{2+}$ isomers. *International Journal of Quantum Chemistry*, v. 12, n. 20, p. 3303-3311, 2012.

MARTINEZ, R. et al. Production of NH_4^+ and OCN^- ions by the interaction of heavy--ion cosmic rays with CO-NH_3 interstellar ice. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 444, n. 4, p. 3317-3327, 2014.

MENDOZA, E. et al. X-ray photodesorption and proton destruction in protoplanetary disks: pyrimidine. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 433, n. 4, p. 3440-3452, 2013.

MENDOZA, E. et al. Molecules with a peptide link in protostellar shocks: a comprehensive study of L1157. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 445, n. 1, p.151-161, 2014.

PILLING, S. et al. H. M. Photodissociation of organic molecules in star-forming regions-II: acetic acid. *Astronomy & Astrophysics*, v. 449, n. 3, p. 1289-1296, 2006.

RIBEIRO, F. A. et al. Fragmentation and ion desorption from condensed pyrimidine by electron impact: implications for cometary and interstellar heterocyclic chemistry. *Journal of Physical Chemistry C*, v. 118, n. 45, p. 25978-25986, 2014.

RIBEIRO, F. A. et al. Non-thermal ion desorption from an acetonitrile (CH_3CN) astrophysical ice analogue studied by electron stimulated ion desorption. *Physical Chemistry Chemical Physics*, v. 17, n. 41, p. 27473-27480, 2015.

PLANETAS HABITÁVEIS

Onde estão os lugares no Universo adequados ao nosso ou outros tipos de vida?

Capítulo 4

Gustavo Porto de Mello

Habitabilidade

A Terra é obviamente um planeta habitável, mas como estabelecer que um planeta é potencialmente capaz de manter formas de vida durante bilhões de anos? Quais são os critérios usados para reconhecer essa habitabilidade? A existência e manutenção da vida, tal como a conhecemos na Terra, é baseada em um conjunto de propriedades razoavelmente bem estabelecido, embora permaneçam dúvidas sobre diversos detalhes. Entre as propriedades mais essenciais está uma estrela de longa vida, como o Sol, capaz de proporcionar energia luminosa de modo estável durante vários bilhões de anos (Figura 4.1). Esse longo tempo é necessário em função do que aprendemos com o exemplo da Terra: a evolução da vida em nosso planeta exigiu uma longa trajetória desde os mais simples micro-organismos até o surgimento de vida complexa, ou pelo menos de seu aparecimento no registro fóssil, e por fim de inteligência. Parece razoável supor que tal evolução exigirá

também em outros planetas um tempo bastante longo, de pelo menos alguns bilhões de anos.

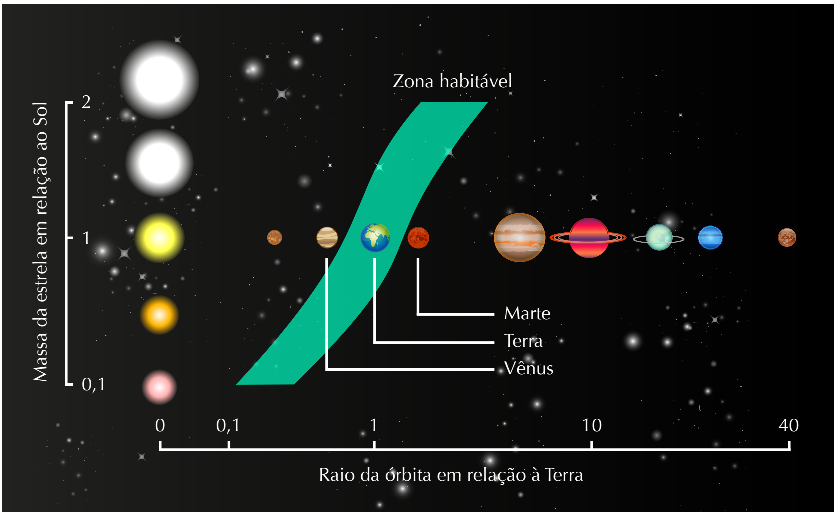


Figura 4.1. Ilustração da zona habitável e da massa estelar em relação ao Sol. Fonte: Adaptado de Wikimedia Commons

As condições de habitabilidade em um sistema planetário estão diretamente ligadas à massa da estrela, que fixa não apenas sua luminosidade, mas também seu tempo de vida, determinando, desse modo, o prazo no qual a estrela será capaz de manter um planeta habitável. Do ponto de vista planetário, outra propriedade essencial é a existência de um planeta dito "rochoso", tal como a Terra, que seja capaz de manter água líquida na superfície durante os bilhões de anos supostamente necessários para a evolução de vida multicelular. Esse planeta deve ainda possuir um campo magnético expressivo, capaz de proteger sua superfície e sua biosfera do ataque de partículas energéticas provenientes dos ventos estelares e dos raios cósmicos. Deve também ser capaz de manter atividade geológica durante bilhões de anos, como veremos adiante. A exigência de tais atributos é basicamente "chauvinista", ou seja, está ancorada em nosso conhecimento imediato de como a vida surgiu

e evoluiu no planeta Terra: essa é a única fórmula conhecida pela ciência que com certeza produziu resultados. Podemos imaginar formas de vida baseadas em outros líquidos que não a água? Podemos conceber uma bioquímica diferente da terrestre, capaz de funcionar em substratos como o metano e o nitrogênio líquido? Ou haveria a possibilidade de manutenção de vida baseada em água líquida, porém em planetas, ou mesmo satélites, completamente diferentes da Terra? Todas essas perguntas são fundamentais para avaliarmos as possibilidades de vida no Universo como um todo. As respostas, embora firmemente respaldadas por nosso conhecimento atual, permanecem ainda no terreno da especulação.

A formação de um planeta habitável

Que tipo de estrela é capaz de manter um planeta habitável atendendo a todas essas características? Com que frequência esperaríamos encontrar tais planetas em nossa galáxia e no Universo? Para responder a essa pergunta, devemos começar com a formação desses planetas, um evento que, hoje sabemos, acompanha de modo natural a gênese das próprias estrelas. Tudo se inicia quando um pequeno fragmento de uma das grandes nuvens de gás e poeira que existe no disco da galáxia colapsa lentamente sob a ação de sua própria gravidade, formando o que chamamos de "nebulosa protoestelar". O colapso transforma energia gravitacional em energia térmica e produz, no centro da nebulosa, uma região quente e densa, que virá a ser a futura estrela. A nebulosa protoestelar agora se torna também uma nebulosa protoplanetária: enquanto a estrela prossegue em seu processo de formação (que no caso de uma estrela como o Sol dura 10 milhões de anos) a parte periférica da nebulosa, menos densa e mais fria, inicia um processo chamado de coagulação de planetesimais. Grãos de poeira, pequenos fragmentos de gelo e moléculas de gás colidem e se aglutinam; paulatinamente, partículas de frações de milímetro de diâmetro crescem, colidem mais e crescem ainda mais, e vão adquirindo dimensões de metros, depois quilômetros e por fim milhares de quilômetros. Ao chegarem

a essas dimensões, tornam-se planetesimais, tão massivos que começam a se atrair mutuamente.

Nessa etapa, no centro da nebulosa, a estrela está quase toda desenvolvida e pronta para nascer; reações nucleares se iniciaram em seu centro, transformando hidrogênio em hélio e inaugurando a vida da estrela na chamada "sequência principal", na qual ela permanecerá brilhando de modo estável durante quase toda sua existência. A radiação da estrela varre a nebulosa planetária, dissipando o gás e evaporando o gelo e as partículas sólidas. Enquanto a matéria-prima da formação planetária é ejetada da nebulosa, os planetesimais interagem, colidem entre si, mesclam-se e crescem. Se crescem muito rapidamente, podem tornar-se tão massivos que são capazes de aglutinar o material mais leve, principalmente o gás hidrogênio, e nesse caso incham de modo galopante e se transformam em gigantes gasosos, como Júpiter e Saturno. Caso não consigam acumular muito gás, tornam-se gigantes de gelo como Urano e Netuno; se nunca atingirem o tamanho necessário para acumular gás, serão planetas rochosos como Terra, Vênus e Marte. A formação de planetas é uma corrida contra o tempo: ao mesmo tempo em que a gravidade da nebulosa puxa o material sólido em direção a sua parte central, a radiação da estrela nascente evapora e expulsa esse material.

Ao final do processo, temos um grupo de planetas formados e uma quantidade de resíduos sólidos sob a forma de pequenos corpos, asteroides e cometas: todo o gás, o gelo e a poeira foram expulsos do sistema (Figura 4.2).

De onde veio a água do planeta Terra?

Os planetas pequenos e rochosos nascem normalmente com pouca água. A razão disso é que eles se formam na parte interna e quente da nebulosa protoplanetária, em que a alta temperatura concentra material sólido, como rochas e metais, evaporando o material volátil, como a água, a amônia e o metano. Após o período de formação dos planetas segue um período de estabilização, no qual os diversos corpos residuais, cometas e asteroides aos poucos interagem gravitacionalmente com os planetas

recém-formados e são por eles atraídos. Esse período durou centenas de milhões de anos em nosso Sistema Solar e foi chamado de o "Grande Bombardeio". Impactos titânicos na superfície da Terra ocorriam cotidianamente. Acredita-se que a vida só se tornou possível depois que a pior fase desse bombardeio terminou, cerca de 3,8 bilhões de anos atrás. A evidência geológica mostra que os fósseis mais antigos podem datar exatamente desse período. Qual foi a importância do Grande Bombardeio? Parte do material que foi agregado pela Terra durante essa fase vinha das partes externas do Sistema Solar, onde as baixas temperaturas permitiam a mais fácil condensação de voláteis como a água. Desse modo, os oceanos da Terra foram formados por material "extraterrestre", oriundo das regiões da nuvem protoplanetária muito mais distantes do Sol que a Terra. Simulações de computador mostram que a presença dos planetas gigantes nas partes externas do Sistema Solar, como Júpiter e Saturno, foi essencial para que esse material volátil pudesse finalmente ser trazido para a Terra. Alguns cientistas sugeriram que uma arquitetura planetária diferente em nosso Sistema Solar, sem a gravidade dos planetas gigantes perturbando os pequenos corpos ricos em água das regiões distantes, teria produzido um planeta Terra com pouca ou nenhuma água – e talvez sem vida.

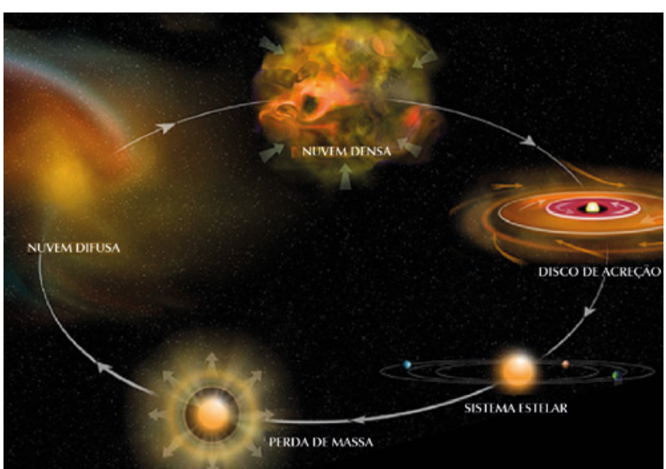


Figura 4.2. As fases do processo de formação planetária. Fonte: Adaptado de Harvard Smithsonian Center for Astrophysics (CfA)

O efeito estufa: vilão ou herói?

Todas as formas de vida, sem exceção, vivem exclusivamente imersas em água líquida durante pelo menos uma etapa de seu desenvolvimento. Algumas espécies permanecem nela durante toda a vida; os seres humanos passam nove meses no "oceano" do útero antes de estarem aptos à vida na superfície seca da Terra, e todas as espécies dependem crucialmente de água líquida para o seu metabolismo. A importância da água líquida é tão grande que ela governa nossa definição de habitabilidade planetária. Definimos como a *zona habitável* de um sistema planetário aquela região ao redor de uma estrela em que sua energia luminosa permite temperaturas suficientes para que a água se mantenha no estado líquido, ou seja, entre 0 e 100 °C, para condições normais de pressão.

Entretanto, a luminosidade de uma estrela e sua distância de um planeta não são os únicos fatores que influenciam sua habitabilidade. A temperatura na superfície de um planeta, que determina a possibilidade da existência de água líquida, depende, obviamente, da energia recebida da estrela, mas também de uma propriedade fundamental de sua atmosfera, que é a capacidade de receber a energia luminosa estelar, transformá-la em calor e reter esse calor na superfície. Essa capacidade recebe o nome de *efeito estufa*, e ele está em total evidência na mídia e nos assuntos atuais da humanidade. A preocupação é que o aumento da intensidade do efeito estufa provocado pela ação humana poderá levar a extremas mudanças climáticas, ao aquecimento do planeta e à elevação do nível dos oceanos, trazendo inúmeros problemas para nossa civilização. O efeito estufa, porém, tão acusado em nossos tempos como um grande vilão da habitabilidade terrestre, é a grande chave para a manutenção da vida em nosso planeta durante bilhões de anos. Sem sua presença, a Terra não teria a mesma capacidade de manter água líquida em sua superfície e seria habitável por muito menos tempo – ou mesmo seria hoje um planeta inabitável, sem água líquida e sem vida. O que estamos fazendo atualmente, com a queima de combustíveis fósseis e processos industriais, é meramente mudar seu ponto de equilíbrio.

Esse ponto de equilíbrio já foi mudado no passado, sem qualquer influência do ser humano, e continuará a ser mudado no futuro. A própria luminosidade solar está aumentando muito lentamente, no processo normal de evolução do Sol, e é de se esperar que no futuro distante a temperatura da superfície terrestre suba a ponto de impedir a existência de água no estado líquido. Os oceanos terrestres se evaporarão e nosso planeta se tornará inabitável.

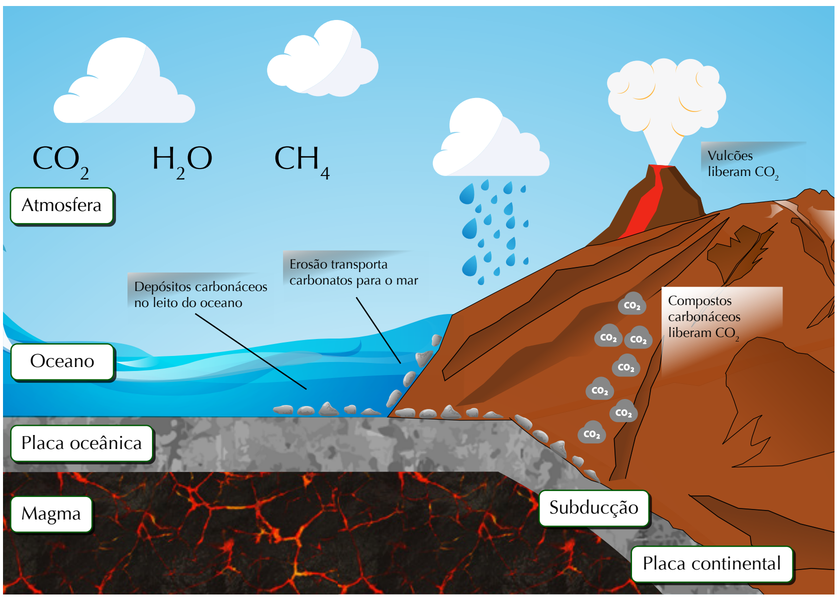


Figura 4.3. Ilustração do processo do efeito estufa natural terrestre. Ilustração: Maurício Marcelo / Tikinet

A atuação do efeito estufa, assim chamado porque é capaz de acumular energia luminosa sob a forma de calor e aumentar a temperatura da superfície planetária (um processo idêntico ao que permite o crescimento de plantas tropicais em estufas com paredes de vidro em países frios), depende de diversos fatores. Todos estão ligados às propriedades planetárias, e a principal delas é a composição da atmosfera. Diversas moléculas que compõem a atmosfera dos planetas do Sistema Solar possuem a propriedade de deixar passar livremente a radiação luminosa, mas impedir a saída

da radiação infravermelha, ou radiação do calor. Os principais gases que contribuem para o efeito estufa são o dióxido de carbono (ou gás carbônico), o vapor de água e o metano. Molécula por molécula, o metano é o mais eficiente dos três, mas possui concentração na atmosfera extremamente baixa, por ser facilmente destruído pelo oxigênio. Depois vem o dióxido de carbono, que tem concentração baixa e pouco variável. Por último, temos o vapor d'água, que dá conta da maior parte do efeito estufa, mas cuja concentração é altamente variável na atmosfera (Figura 4.3). Essa é a razão pela qual a Terra possui um ciclo hidrológico, com incessante evaporação da água dos lagos, rios e oceanos e sua posterior condensação e precipitação, além do acúmulo de água congelada em regiões frias.

Um termostato climático

A presença desses gases por si só, porém, não é capaz de manter o efeito estufa operacional por longas escalas de tempo. São necessários mecanismos que regulem a presença desses gases na atmosfera, impedindo que seu excesso aqueça demasiadamente o planeta, e que sua escassez torne a temperatura baixa demais. Esses mecanismos são essencialmente geológicos: a *atividade vulcânica*, que abastece a atmosfera continuamente com esses gases; a *tectônica de placas*, que faz com que material rochoso da superfície terrestre seja reciclado no magma abaixo da crosta, e que material jovem e incandescente desse magma seja trazido para a superfície; e a *erosão* ou *intemperismo*, que faz que os minerais da superfície reajam constantemente com os gases atmosféricos, ajudando a controlar sua concentração.

A conexão entre o vulcanismo, a tectônica de placas e a erosão determina um ciclo chamado de "carbonato-silicato", do qual alguns detalhes permanecem ignorados, mas cujo funcionamento essencial é bem compreendido. A presença de gases do efeito estufa na atmosfera aquece o planeta, provocando a evaporação da água e sua precipitação sobre os continentes. A água dissolve o solo e as rochas com o auxílio do gás carbônico, transformando-os

em uma classe de minerais chamada de *carbonatos*. Esses minerais são carregados sob a forma de sedimentos para o mar, acumulando-se no fundo dos oceanos. O processo de tectônica de placas eventualmente faz que esses sedimentos sejam transportados para o magma, sendo volatilizados e devolvendo o gás carbônico, que finalmente retorna à atmosfera nas erupções vulcânicas, fechando o ciclo.

O que acontece quando o gás carbônico se acumula na atmosfera em períodos de intensa atividade vulcânica? Sua maior concentração aquece o planeta e acelera o processo de evaporação e precipitação da água, aumentando também a taxa de erosão, que ajuda a remover gás carbônico da atmosfera, recuperando o equilíbrio. Da mesma forma, períodos de baixa atividade vulcânica tendem a provocar a diminuição da concentração de gás carbônico na atmosfera, e desse modo a erosão desacelera, permitindo que o gás carbônico novamente se acumule na atmosfera. O retorno eventual da atividade vulcânica, inevitável em um planeta geologicamente ativo como a Terra, garante que o abastecimento dos gases do efeito estufa seja sempre renovado.

A principal incerteza de nosso conhecimento desses processos vem do papel ambíguo desempenhado pela presença de nuvens. O vapor de água, como vimos, é um importante gás do efeito estufa e sua concentração na atmosfera aquece o planeta. Por outro lado, esse aquecimento promove a formação de nuvens de vapor d'água, e essas ajudam a refrescar a superfície planetária pelo seu efeito de reflexão, ou seja, elas devolvem energia solar para o espaço antes que ela possa ser absorvida pela Terra. Os modelos teóricos atuais postulam que a presença de nuvens de vapor de água irá determinar o limite máximo de energia luminosa que um planeta poderá receber. Se a temperatura aumenta até o ponto no qual a atmosfera torna-se tão saturada de água que o maior aquecimento não pode mais ser compensado pela presença de nuvens, o planeta começa a perder seus oceanos e inicia uma trajetória irreversível rumo à inabitabilidade. Esse limite representa fisicamente uma distância mínima, de acordo com a

luminosidade da estrela, na qual um planeta como a Terra já não pode ser considerado habitável, definindo, desse modo, o *limite interno da zona habitável*.

O caso oposto, que define o limite externo da zona habitável, é determinado por temperaturas tão baixas que o gás carbônico, um gás bem mais volátil que a água, finalmente começa a se condensar na atmosfera do planeta, formando nuvens de pequenos cristais de gás carbônico (também conhecido como gelo seco). Essas nuvens são extraordinariamente refletivas, devolvendo uma fração tão grande da energia luminosa para o espaço que as temperaturas do planeta baixam ainda mais, promovendo a formação de mais nuvens de gás carbônico, em um ciclo capaz de congelar totalmente a superfície planetária. O planeta seria coberto de nuvens eternas altamente refletivas e acumularia enormes extensões de geleiras, as quais são também muito eficientes em refletir energia de volta para o espaço. A temperatura superficial planetária cai a um ponto no qual a água líquida já não pode existir de modo estável.

Em nosso Sistema Solar, essas distâncias-limite variam desde mais ou menos 70% da distância da Terra ao Sol, em um ponto próximo da órbita de Vênus, mas sem incluir esse planeta, e até uma distância cerca de 40% maior que a distância da Terra ao Sol, incluindo, nesse caso, a órbita de Marte. Quais são as principais incertezas desses modelos teóricos? A maior delas é a grande dificuldade de calcular a formação das nuvens, tanto de vapor de água quanto de dióxido de carbono. O papel dessas nuvens é ambíguo, pela sua capacidade tanto de reter o calor na superfície do planeta, quando de evitar que a radiação luminosa atinja essa superfície com suas propriedades refletivas. Assim, pequenos detalhes das propriedades dessas nuvens podem mudar os valores dos limites internos e externos da zona habitável.

Vênus e Marte: projetos fracassados

Um poderoso esclarecimento a respeito de como esses modelos descrevem bem a realidade é dado por nossos planetas vizinhos, Vênus e Marte. Seria possível aprender algo com eles? O

que suas condições nos informam sobre o passado e o presente da Terra – ou, o que é ainda mais importante, sobre o seu futuro?

Vênus é um planeta quase gêmeo da Terra no que diz respeito à massa e ao tamanho, mas as semelhanças param por aí. Eternamente coberto de nuvens, com uma pressão atmosférica 90 vezes superior à terrestre e uma temperatura superficial de quase 500 °C, Vênus é um excelente exemplo de planeta onde o efeito estufa descontrolou-se completamente. Os modelos de habitabilidade sugerem que Vênus jamais esteve no interior da zona habitável do Sistema Solar. Formado muito mais próximo do Sol, Vênus, em princípio, deve ter recebido uma quantidade de água comparável com a terrestre, mas não teve oportunidade de fazer funcionar um efeito estufa equilibrado. Com a atmosfera saturada de vapor de água, as temperaturas na superfície de nosso planeta irmão desde o início de sua vida eram elevadas demais para manter a água líquida na superfície. Vênus aprisionou-se em um eterno efeito estufa galopante que acarretou a completa evaporação de seus pressupostos oceanos, transformando o planeta no inferno que hoje observamos. Vênus jamais teve uma chance.

Marte nos ensina uma lição completamente diferente. Muito menor do que a Terra, com dez por cento da massa e metade do tamanho, o planeta aparentemente sempre esteve dentro da zona habitável. As imagens de sondas espaciais desde os anos 1970 revelaram a presença de imensos sulcos na superfície marciana, com todo o aspecto de terem, no passado, abrigado grandes fluxos de água líquida. Entretanto, Marte hoje em dia é um deserto completamente seco e muito frio, com uma temperatura média na superfície de 50 graus Celsius abaixo de zero. Se o planeta possui grande quantidade de água, onde ela foi parar? A melhor explicação envolve não um problema com a distância de Marte ao Sol (o planeta está e talvez sempre tenha estado dentro da zona habitável), mas com o tamanho de Marte. Pequeno e de baixa gravidade, o planeta não possui a mesma capacidade da Terra de manter uma atmosfera espessa: sua atmosfera possui menos de 1% da pressão terrestre. Sem campo magnético, e de calor interno reduzido, o

planeta rapidamente perdeu sua atividade geológica. O vulcanismo em Marte parece ter sido intenso, porém muito breve. Não há evidência de atividade vulcânica em Marte nos últimos bilhões de anos. Incapaz de manter a atividade tectônica de placas, incapaz de manter seu vulcanismo, e sem possuir um campo magnético protetor para sua atmosfera, ao longo das centenas de milhões de anos depois de seu nascimento, Marte paulatinamente sofreu a evaporação de sua atmosfera e de seus hipotéticos oceanos. A atividade vulcânica cessou e não mais abasteceu a atmosfera com gases do efeito estufa. A ausência da tectônica de placas impediu a reciclagem entre os minerais da crosta e o magma planetário, transformando Marte em um deserto seco, frio e (pelo menos em sua superfície) aparentemente sem vida. Enquanto a Terra florescia e desenvolvia vida, Vênus agonizava sob um excesso de efeito estufa, e Marte desidratava, padecendo da escassez desse mesmo efeito estufa.

E o futuro?

Estudos recentes revelaram em nossa galáxia muitas centenas de planetas em estrelas vizinhas do Sol. Muito pouco se sabe sobre esses mundos: basicamente as distâncias de suas estrelas e suas massas e, em poucos casos, suas dimensões. A maioria desses exoplanetas descobertos pertence à categoria de gigantes gasosos como Júpiter; alguns são aparentemente gigantes de gelo, como Urano. Diversos deles, porém, parecem ter características de planetas rochosos como a Terra. Vários estão situados a distâncias compatíveis com a presença de água líquida em suas superfícies e poderiam ser considerados habitáveis dentro do nosso conhecimento. Algumas estimativas otimistas sugerem que cerca de 30% das estrelas da nossa galáxia poderiam ter planetas habitáveis. Mesmo que esse valor seja muito otimista, o número de estrelas em nossa galáxia é tão vasto que uma fração de 1% de estrelas com planetas habitáveis ainda acarretaria um bilhão de planetas com possibilidade de abrigar vida como nós a conhecemos! Claramente, o número de planetas potencialmente habitáveis apenas em nossa galáxia desafia a imaginação.

Entre as grandes questões que se colocam estão: quantos deles permitiram o desenvolvimento de vida? Quantos destes permitiram que a vida evoluísse até um estágio de alta complexidade? Quantos ainda desenvolveram vida inteligente, do mesmo modo que nós agora o fazemos, procurando por companhia, especulando sobre as condições físicas de mundos que apenas recentemente, com o progresso da ciência e tecnologia, começam a ser explorados?

Vida alternativa, zonas habitáveis alternativas?

Acredita-se que um substrato sólido é absolutamente essencial para o surgimento de qualquer tipo de vida. O funcionamento da vida é governado por reações químicas moleculares complexas, autoestruturadas e auto-organizadas. Essas reações não podem ocorrer em um meio sólido: não haveria contato entre as moléculas, impedindo o metabolismo. Em um meio gasoso, esses processos também seriam impossíveis: a velocidade das reações seria excessiva e incontrolável, impedindo a auto-organização. Um meio líquido permite, ao mesmo tempo, a troca molecular eficiente e sua organização. Mas seria a água a única alternativa? Nosso tipo de vida é baseado na excepcional capacidade dos átomos de carbono de formar longas cadeias de átomos, chamadas de *polímeros*, e de sua capacidade de promover reações complexas e organizadas em um meio aquoso. Haveria substitutos para a água e o carbono? Talvez.

A água é uma molécula dita *polar*, ou seja, diferenças de cargas elétricas produzem pequenas forças dentro da molécula que se atraem entre si. Essa propriedade está na raiz da capacidade da água de se manter líquida em um grande intervalo de temperaturas. Existem outras moléculas polares e abundantes no Universo, como a amônia e o metano, mas nenhuma delas reproduz bem as propriedades da água. O carbono, por sua vez, não é o único átomo capaz de formar complexos *polímeros*, mas é de longe o que faz isso com maior eficiência. Uma possível alternativa ao carbono seria o silício, que é vizinho do carbono na tabela periódica dos elementos. Mas o silício forma ligações

químicas extremamente fracas entre seus átomos e jamais conseguiria funcionar na água.

Cientistas propuseram, então, um tipo alternativo de vida baseado em moléculas de silício, chamadas de *silanos*, em um substrato de nitrogênio líquido. O nitrogênio é um líquido apolar, ou seja, sem assimetrias de cargas elétricas, e assim não prejudicaria as fracas ligações entre as moléculas de silício. Seria um tipo de vida com metabolismo incrivelmente lento se comparado com o nosso: seu funcionamento se daria a 180 °C abaixo de zero, temperatura na qual o nitrogênio permanece líquido.

Desse modo, se queremos procurar vida semelhante a nossa, baseada em carbono/água, temos que procurar locais que permitam a existência da água líquida em nosso Sistema Solar. Essa tem sido a estratégia da Nasa nas últimas décadas, e possíveis candidatos seriam: o planeta Marte e o satélite Europa, uma lua de Júpiter tão grande que se orbitasse o Sol, e não Júpiter, seria facilmente chamada de planeta. Vida baseada em silanos em nitrogênio líquido: Titã, uma enorme lua de Saturno, no momento explorada pela sonda *Cassini*, da Nasa/ESA; e Tritão, outra grande lua, mas do planeta Netuno – foi explorada pela sonda *Voyager II* da Nasa em 1989, e não foi mais visitada por nenhuma sonda espacial desde então. Como poderia Europa possuir água líquida se Júpiter está fora da zona habitável que estamos discutindo? Por uma razão simples: toda a nossa discussão de zona habitável se baseia na existência de água líquida na superfície de um planeta ou satélite.

No caso de Europa, não existe atmosfera, e a água líquida não poderia existir na superfície. Porém, o satélite está completamente coberto de água congelada, e abaixo de todo esse gelo poderia haver, de acordo com os dados da sonda *Galileo*, da Nasa, mais água líquida do que todos os oceanos do planeta Terra somados. O gelo protegeria a água da evaporação e a manteria líquida mesmo com a pouca luz solar que chega na órbita de Júpiter, de modo semelhante ao que ocorre no oceano Ártico, onde a água permanece líquida abaixo do gelo mesmo com o frio intenso da superfície. A energia para manter essa água sob a forma líquida, nas distantes

e geladas partes do Sistema Solar, viria da interação gravitacional entre Júpiter e Europa, produzindo enormes forças de maré e liberando calor no interior do satélite. Em 2011, a Nasa aprovou planos para uma nova sonda, ainda em projeto, que visitará Júpiter com ênfase na exploração de Europa.

A zona habitável galáctica

Felipe Nóbrega Pereira

É possível pensarmos no conceito de habitabilidade em uma escala maior? Além da região de um planeta com condições amenas, além da região circunstelar que permita a existência de água em estado líquido, podemos definir a habitabilidade em escala galáctica? Essa pergunta tem sido abordada em conjunto com estudos da formação e evolução da Via Láctea e outras galáxias. O termo "zona de habitabilidade galáctica" (ZHG) foi cunhado por González et al. (2001), em um trabalho sobre as características predominantes em certas regiões da Via Láctea, junto com janelas temporais em que seria possível o surgimento de vida complexa.

A primeira variável normalmente considerada para a delimitação da ZHG é o risco de ocorrência de uma supernova com proximidade suficiente de um planeta para desestruturar sua biosfera. Esse tipo de explosão, que está entre os eventos de mais alta energia do Universo, ocorre no fim do processo de evolução de estrelas massivas e é mais frequente em certas regiões de uma galáxia, o que pode ser constatado por observações e por modelagens numéricas. Regiões com altas taxas de formação estelar, como o centro da galáxia ou seus braços, têm frequências maiores de supernovas. Acredita-se que a radiação emanada durante esses eventos, na forma de raios X e raios gama, seja capaz de afetar a química da atmosfera de um planeta, por exemplo, destruindo sua camada de ozônio, deixando-o exposto a fluxos de

raios ultravioleta provenientes de sua estrela hospedeira (Thomas et al., 2005; Galante; Horvath, 2007; Mellot et al., 2011). Se a proximidade for muito grande, a própria onda de choque da explosão pode varrer a superfície do planeta. A combinação desses eventos poderia resultar em um forte impacto na vida exposta, seja em continentes ou nas camadas mais rasas (zona fótica) de oceanos e outras massas de água. Pelo menos na Terra, a base da cadeia trófica global (organismos fotossintetizantes) seria altamente afetada.

No entanto, estudos que procuram estimar a frequência com que eventos desse porte ocorrem na Via Láctea e quão letais seriam ainda possuem muitas incertezas (Mellot et al., 2011). A começar pela radiação gerada por essas explosões, o feixe de raios gama seria extremamente nocivo, porém de ocorrência rara e concentrado em uma área pequena. Além disso, não é totalmente claro até que ponto a depleção ou destruição da camada de ozônio resultaria em um dano irreversível para a biota em escala global. A vida marinha, por exemplo, estaria imune à radiação a partir de alguns metros de profundidade. Em teoria, cardumes de atum nadariam incólumes nos oceanos terrestres, mesmo depois desse evento amplamente destrutivo para a vida presente na superfície do planeta, mas talvez acabassem sendo afetados indiretamente pelos danos aos produtores primários. No entanto, sabemos que a vida na Terra passou por eventos de extinção em massa algumas vezes em sua história, mas perseverou.

Outra variável considerada importante na tentativa de delimitar regiões de uma galáxia favoráveis à vida é a metalicidade da região em que se desenvolve o planeta. Em astronomia, definimos, de forma simplificada, metalicidade como a proporção de elementos mais pesados em relação ao hidrogênio e hélio. A metalicidade do Sol, por exemplo, é de aproximadamente 1,8% em massa. Para outras estrelas, a metalicidade é frequentemente expressa como "[Fe/H]", que representa o logaritmo da razão entre a abundância de ferro (comparado com a do hidrogênio) da estrela e a do Sol, que é usado como valor de referência. O ferro

não é o elemento pesado mais abundante nessas estrelas, mas é um dos mais fáceis de medir com dados espectrais e por isso é utilizado. A ideia de se usar a metalicidade é que ela pode ser medida de forma quantitativa e poderia estar associada ao processo de formação planetária, especialmente de planetas rochosos, como Terra e Marte. No entanto, essa correlação com a formação planetária ainda é incerta até o momento. Elementos mais pesados que o hidrogênio são, obviamente, necessários para a formação desses objetos, porém sua proporção e sua influência em fatores como formação da atmosfera, tectonismo de placas e evolução química de um planeta ainda são alvos de muitos estudos e especulações. No outro extremo, a alta metalicidade poderia inviabilizar planetas como a Terra de forma indireta, pela formação mais frequente de planetas do tipo *Hot Jupiters*. Esses gigantes gasosos seriam formados na parte externa do disco protoplanetário, migrando para seu interior com a evolução do sistema estelar e desestabilizando as órbitas dos planetas rochosos que porventura se formaram em regiões de órbitas mais internas. A quantificação dessas relações deve se tornar mais comum com o aumento da estatística de planetas extra-solares catalogados pela missão Kepler e subsequentes.

Apesar desse cenário repleto de incertezas, alguns modelos foram propostos para a delimitação de uma zona de habitabilidade galáctica, traçando regiões do espaço-tempo mais propícias, tanto para o surgimento da vida simples quanto da vida complexa (Figura 4.4) (Lineweaver; Fenner; Gibson, 2004).

Há de se ressaltar que, apesar da indiscutível importância da metalicidade, eventos de supernova e outras variáveis, alguns cientistas consideram os processos físicos atrelados ao conceito de zona de habitabilidade galáctica difíceis de identificar e ainda mais difíceis de quantificar. Esses desafios não nos permitem, ao menos até o momento, tirar conclusões definitivas sobre a extensão de uma zona de habitabilidade galáctica da mesma forma como traçamos uma zona de habitabilidade ao redor de uma única estrela.

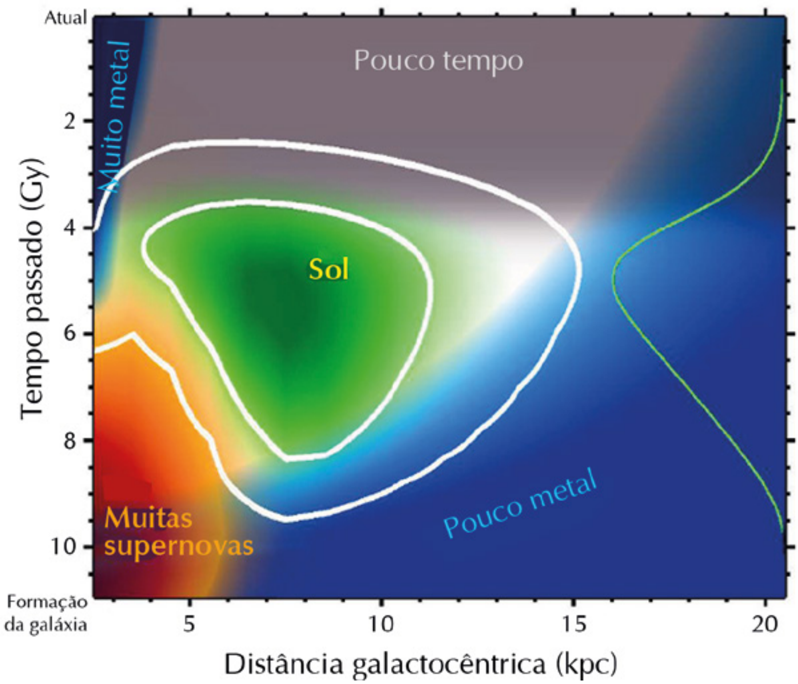


Figura 4.4. ZHG da Via Láctea baseada na taxa de formação de estrelas: metalicidade (azul); tempo (4 ± 1 bilhões de anos) para surgimento de vida complexa (cinza) e ausência de explosões de supernova esterilizantes. Interior dos contornos em branco delimitam o espaço-tempo com maior potencial de abrigar vida complexa. Linha verde à direita é a distribuição estimada de idade da vida no universo. Fonte: Adaptado de Lineweaver, Fenner e Gibson (2004)

Referências

GALANTE, D.; ERNESTO, H. J. Biological effects of gamma-ray bursts: distances for severe damage on the biota. *International Journal of Astrobiology*, Cambridge, v. 6, p. 19, 2007.

GONZALEZ, G.; BROWNLEE, D.; WARD, P. The galactic habitable zone: galactic chemical evolution. *Icarus*, Amsterdam, v. 152, n. 1, p. 185-200, 2001.

LINEWEAVER, C. H.; FENNER, Y.; GIBSON, B. K. The galactic habitable zone and the age distribution of complex life in the Milky Way. *Science*, Washington, v. 303, n. 5654, p. 59-62, 2004.

MELOTT, A. L.; THOMAS, B. C. Astrophysical ionizing radiation and Earth: a brief review and census of intermittent intense sources. *Astrobiology,* New Rochelle, v. 11, n. 4, p. 343-61, 2011.

THOMAS, B. C. et al. Gamma-Ray bursts and the Earth: exploration of atmospheric, biological, climatic and biogeochemical effects. *The Astrophysical Journal,* v. 634, p. 509-33, 2005.

QUÍMICA PREBIÓTICA

A química da origem da vida

Capítulo 5

Dimas A. M. Zaia, Cássia T. B. V. Zaia e Cristine E. A. Carneiro

Introdução

Até meados do século XIX era amplamente aceito pela comunidade científica a teoria da geração espontânea, que foi proposta por Aristóteles (384-322 a.C.). Segundo o filósofo, alguns seres vivos apareciam de forma espontânea e eram formados por poucos elementos básicos, nessa visão, os seres vivos poderiam ser gerados de duas formas diferentes: pelos pais e por geração espontânea. Descrições sobre a geração espontânea podem ser encontradas em antigos textos na China, na Índia, na Babilônia e no Egito, nos quais há descritivos de produção de diversos seres vivos, normalmente feitos a partir de matéria orgânica em estado de putrefação. A teoria da geração espontânea sofreu seu primeiro duro golpe com os experimentos realizados por Francesco Redi (1626-1697), médico florentino, em meados do século XVII. Redi realizou um experimento (mostrado na Figura 5.1) no qual demonstrou que vermes não apareciam espontaneamente e que eram larvas de moscas que colocavam seus ovos na carne em

putrefação. O experimento de Redi está descrito em seu livro de 1668 *Experimentos sobre a geração de insetos* (*Esperienze intorno alla generazione degl'insetti)*. No entanto, os adeptos da geração espontânea não se deram por vencidos. O biólogo inglês John Turberville Needham (1713-1781) realizou uma série de experimentos com diversos tipos de extratos aquecidos em frascos que algumas vezes eram selados hermeticamente, mostrando que após alguns dias micro-organismos poderiam ser detectados. A refutação final da teoria da geração espontânea veio com os experimentos do químico Frances Louis Pasteur (1822-1895) e do físico irlandês John Tyndall (1820-1893), sendo então admitido que a vida pudesse vir de outra vida. O naturalista inglês Charles Robert Darwin (1809-1882) propôs que a vida poderia ter sido originada em uma pequena lagoa de água aquecida contendo os nutrientes adequados. Entretanto, Darwin nunca desenvolveu essa ideia. Após os experimentos de Pasteur, por um período de quase 60 anos não foram levantadas mais questões sobre a origem da vida.

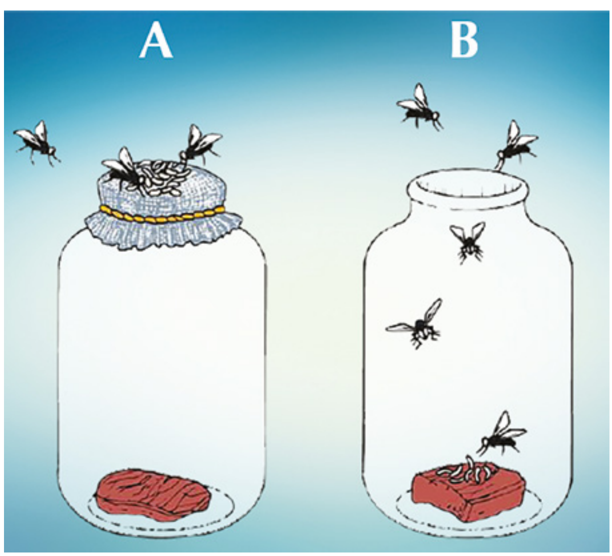


Figura 5.1. Experimento de Redi. Em (a) o frasco foi coberto com uma tela impedindo que as moscas depositassem suas larvas, em (b) o frasco não foi coberto com uma tela e, portanto as moscas podem depositar suas larvas. Fonte: IAG

Em 1924, o bioquímico russo Alexander Ivanovich Oparin (1894-1980) e, independentemente, em 1929, o geneticista inglês John Burdon Sanderson Haldane (1892-1964) propuseram um esquema para a origem da vida a partir da matéria inanimada. Esse esquema é mostrado na Figura 5.2 que, em linhas gerais, sugere que moléculas simples, tais como CO_2, CO, CH_4, NH_3, N_2, H_2S etc., reagem entre si formando moléculas complexas como aminoácidos, bases nucleicas, lipídios, açúcares etc. Por sua vez, essas moléculas reagem entre si formando polímeros, que poderiam se combinar para formar o que Oparin chamou de "estruturas coacervadas" – essas estruturas lembram células, mas não são.

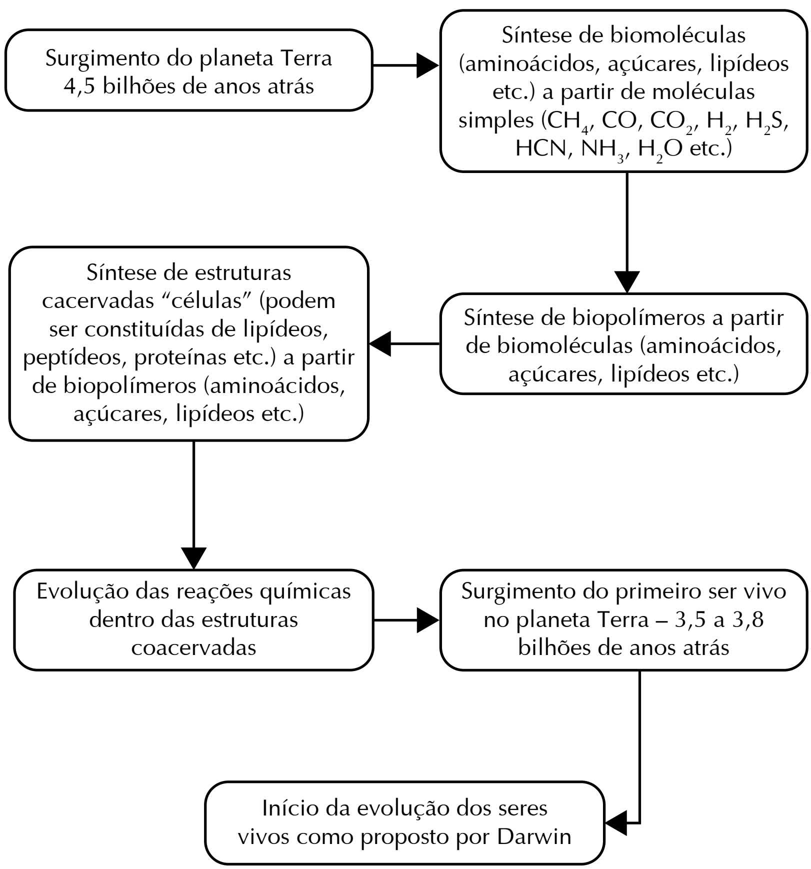


Figura 5.2. Esquema de Oparin-Haldane para o surgimento da vida

Dentro das estruturas coacervadas, reações ocorreriam e, depois de algum tempo, atingiriam uma complexidade que teriam todas as características de um ser vivo. Esse esquema é atualmente conhecido como hipótese de Oparin-Haldane. É importante salientar que todos esses processos levariam milhões de anos. A formação de biomoléculas a partir de moléculas simples, nas condições existentes na Terra primitiva, só foi confirmada a partir do experimento de Stanley Lloyd Miller (1930-2007) e Harold Clayton Urey (1893-1981), realizado em 1953.

A Figura 5.3 mostra o equipamento que foi montado por Miller e Urey, em que foram adicionados gases (metano-CH_4, amônia-NH_3 e hidrogênio-H_2), que supostamente representariam os gases presentes na atmosfera da Terra prebiótica e estariam simulando sua atmosfera. A água adicionada ao sistema foi aquecida a 80 °C, simulando o mar da Terra primitiva, tal aquecimento faria o sistema circular e as descargas elétricas produzidas por eletrodos colocados no equipamento seriam a fonte de energia e simulariam os raios; após alguns dias, foi possível detectar os aminoácidos α-alanina, ácido aspártico, β-alanina e α-aminoácido-n-butírico. Portanto, o experimento de Miller e Urey confirmou a hipótese de Oparin-Haldane e iniciou um novo ramo da ciência chamado de “química prebiótica”.

Posteriormente, algumas críticas foram feitas em relação ao experimento de Miller, uma delas afirmava que a atmosfera terrestre jamais foi tão redutora (metano-CH_4, amônia-NH_3, hidrogênio-H_2) como supuseram Miller e Urey, mas sim neutra ou oxidante (metano-CH_4, nitrogênio-N_2, monóxido de carbono-CO, dióxido de carbono-CO_2, hidrogênio-H_2), dependendo das quantidades CO e CO_2. O problema de se utilizar atmosferas neutras/oxidantes em experimentos como o de Miller é que a quantidade de aminoácidos sintetizados é muito baixa. No entanto, quando foram utilizadas fontes de energia mais intensas, mesmo utilizando atmosferas neutras/oxidantes, aminoácidos foram sintetizados em grandes quantidades e variedades. Outra crítica feita ao experimento de Miller era que os aminoácidos produzidos ao atingirem o mar da Terra prebiótica seriam diluídos,

impossibilitando a formação de peptídeos/proteínas. Porém diversos experimentos mostraram que minerais podem pré-concentrar os aminoácidos e inclusive catalisar a formação de peptídeos/proteínas.

Desde então, vários experimentos mostraram que as questões levantadas em relação ao experimento de Miller foram resolvidas.

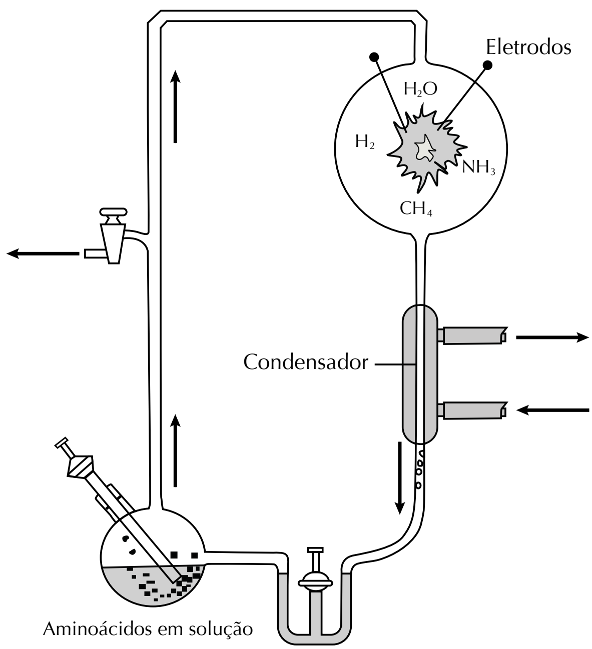


Figura 5.3. Equipamento utilizando por Miller para a síntese de aminoácidos a partir de gases que supostamente fariam parte da atmosfera da Terra prebiótica. Nesse experimento, foram utilizados os gases metano (CH_4), amônia (NH_3) e hidrogênio (H_2) e, após alguns dias, foram detectados os aminoácidos α-alanina, ácido aspártico, β-alanina e α-aminoácido-n-butírico. Fonte: IAG

Química prebiótica

A química prebiótica estuda todas as reações e processos que poderiam ter contribuído para a origem da vida do planeta Terra, sendo uma ciência interdisciplinar que utiliza informações e conhecimentos de diversas áreas, tais como: astrofísica, geologia, química, bioquímica, biologia, matemática e física com o objetivo de explicar o aparecimento da vida. Nos experimentos de química

prebiótica, as substâncias e condições de reação que possivelmente existiram na Terra antes do surgimento da vida devem ser usadas. Quando a vida surgiu na Terra é outro fator relevante e, apesar de esse assunto ser ainda controverso, evidências mostram que no período entre 3,5 e 3,8 bilhões de anos atrás já existia alguma forma de vida em nosso planeta. Portanto, as condições de reação e substâncias que já existiam na Terra há mais de 3,8 bilhões de anos devem ser utilizadas nos experimentos de química prebiótica.

No entanto, antes de discutir sobre os ambientes que foram responsáveis pela síntese de moléculas que originaram a vida na Terra prebiótica, é relevante ressaltar que existiram duas fontes dessas moléculas. A Figura 5.4 mostra as duas fontes de biomoléculas da Terra prebiótica: as endógenas, ou seja, as fontes terrestres, e as exógenas, as fontes extraterrestres. As fontes endógenas de biomoléculas seriam a atmosfera, vulcões, hidrotermais, reações em estado sólido e em solução aquosa ou mesmo combinações dessas fontes. As fontes exógenas de biomoléculas seriam os meteoros, cometas e poeira interestelar. Quanto cada uma dessas fontes contribuiu para a totalidade das moléculas da Terra prebiótica é ainda objeto de muita discussão na comunidade científica. Neste capítulo, será discutida somente a contribuição das fontes endógenas (terrestres) para a síntese de biomoléculas e, consequentemente, sua possível contribuição para a origem da vida em nosso planeta.

Ambientes estudados em química prebiótica

Os seguintes ambientes são estudados em química prebiótica: reações com misturas gasosas, reações em estado sólido, ciclos de hidratação e desidratação, reações em solução aquosa e hidrotermais.

Reações com misturas gasosas

Em experimentos de química prebiótica envolvendo gases, como a simulação da atmosfera da Terra, é necessário utilizar

os gases que existiram na Terra antes da origem da vida, assim como as possíveis fontes de energia daquela época. Nesse ponto, uma questão precisa ser respondida: quais eram os gases existentes na Terra antes do início da vida? Diferente da atmosfera de hoje, a concentração de oxigênio (O_2) da Terra prebiótica era muito baixa, e a exata composição química da atmosfera da Terra prebiótica é assunto controverso no meio científico, porém os seguintes gases muito provavelmente estavam presentes na atmosfera: CO_2, CO, CH_4, N_2, H_2, H_2O (vapor) e H_2S.

As fontes de energia disponíveis para a síntese de moléculas nessa atmosfera eram as mais variadas: descargas elétricas, radiação ultravioleta (UV), aquecimento, partículas de alta energia etc. Devemos destacar aqui que a maior fonte de energia da Terra prebiótica para a síntese de biomoléculas era proveniente do Sol na forma de radiação UV. Diferente de hoje, o planeta Terra naquela época não estava protegido da radiação UV por uma camada de ozônio (O_3), pois a concentração de oxigênio era muito baixa. Assim, muito provavelmente a atmosfera presente na época contribuiu bastante para a síntese das biomoléculas necessárias para a origem da vida. A Tabela 5.1 mostra alguns experimentos. Os 20 aminoácidos mais comumente encontrados em todos os seres vivos são chamados de "aminoácidos proteicos" – alguns deles foram sintetizados nos experimentos mostrados na Tabela 5.2: asparagina, ácido aspártico, cisteína, ácido glutâmico, glicina, histidina, isoleucina, leucina, lisina, prolina, treonina e valina. Além dos aminoácidos proteicos, diversos outros aminoácidos chamados "não proteicos", que são comumente encontrados em meteoros, também foram sintetizados. Além disso, outras moléculas que são importantes para os seres vivos ou precursoras destas também foram sintetizadas, tais como: bases nucleicas do DNA/RNA, ureia, ácidos carboxílicos, imidazol, ácido cianídrico, formaldeído e microestruturas orgânicas.

Tabela 5.1. Misturas de gases e fontes de energia utilizadas em experimentos simulando atmosferas da Terra prebiótica

ATMOSFERAS REDUTORAS	
Mistura de gases	**Fonte de energia**
CH_4, NH_3, H_2O, H_2	Descarga elétrica
CH_4, C_2H_6, NH_3, H_2O	Ondas de calor
CH_4, C_2H_6, NH_3, H_2O, H_2S	UV (253.7, 184.9 nm)
CH_4, NH_3, H_2O, CH_3SH, C_2H_6, H_2S, C_2H_5OH, $C_2H_5NH_2$	Hidrogênio aquecido (UV-220-280 nm)
CH_4, N_2, H_2O, argilas (montmorillonita, bentonita)	Descarga elétrica
CH_4, N_2, H_2O, H_2, $FeCl_2$, FeS, $FeCO_3$, diversos sais (NaCl, KCl, $MgCl_2$, $CaCl_2$, $NaHCO_3$)	Descarga elétrica
ATMOSFERAS NEUTRAS/REDUTORAS	
Mistura de gases	**Fonte de energia**
CO_2, N_2, H_2O	Descarga elétrica
CO_2, N_2, H_2O (mais oceano aquecido com sais)	Descarga elétrica
CO, N_2, H_2O	Descarga elétrica
CO_2/CO, N_2, H_2O	Descarga elétrica
CO_2/CO, N_2, H_2O	Pulso de laser (infravermelho próximo)
CO/CO_2, N_2, H_2O	Prótons (2.0-4.0 MeV)
CO, N_2, H_2O	Raio X
CO, N_2, H_2O	Raio X (1-2 keV)
CO, N_2, H_2O	Plasma (10.000 K)

Reações em estado sólido

No caso do estudo de reações envolvendo substâncias em estado sólido são mimetizados os seguintes ambientes: a) a erupção de um vulcão derrama lava que aquece o solo e a energia liberada pode ser utilizada para reações químicas e b) impacto de cometas

e meteoros libera calor que pode ser utilizado para reações químicas. A formação de polímeros é um passo importante para o aumento da complexidade das estruturas formadas. A Figura 5.4 mostra a formação de um dipeptídeo e, como resultado, há a liberação de uma molécula de água. No entanto, para a formação desses polímeros, a liberação de uma molécula de água faz parte do processo reacional e, em solução aquosa, essa reação é termodinamicamente desfavorável, o que significa que não ocorre. As reações em estado sólido são ideais para a formação de peptídeos/proteínas, nas quais o aquecimento em estado sólido sem presença de água facilita sua saída. Diversos estudos foram realizados com o aquecimento de aminoácidos mais minerais, sendo que aquecendo misturas de diversos aminoácidos na faixa de temperatura entre 160 e 210 °C foi possível obter peptídeos de até 25 mil Daltons, ou seja, seria o mesmo que 250 aminoácidos (peso molecular médio de 100 Daltons) fossem ligados formando uma longa cadeia. Pesquisadores demonstraram que é possível formar di ou tri-peptídeos em temperaturas relativamente baixas (50 a 60 °C), quando aminoácidos foram aquecidos com minerais. Em estudos de reações em estado sólido também foram obtidas outras substâncias como: aminoácidos, hidrocarbonetos e ácidos carboxílicos.

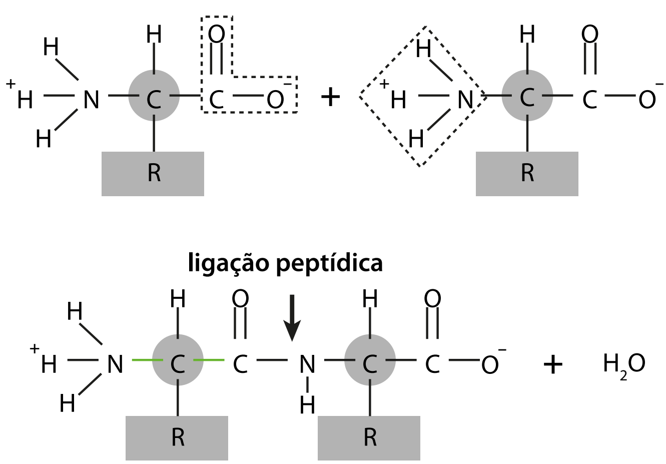


Figura 5.4. Formação da ligação peptídica

Ciclos de hidratação e desidratação

Para as reações envolvendo ciclos de hidratação e desidratação, alguns ambientes que poderiam ser encontrados na Terra prebiótica podem ser mimetizados. Chuvas formariam pequenas lagoas (hidratação), o calor do sol as secaria (desidratação) e, algum tempo depois, novamente choveria formando outra vez essas lagoas, resultando em um ciclo. As marés também poderiam proporcionar ciclos de hidratação e desidratação; na maré alta, lagoas seriam formadas e, na maré baixa em conjunto com o efeito do calor do sol, essas lagoas secariam. Portanto, ciclos de hidratação e desidratação muito provavelmente foram comuns na Terra prebiótica. Devido à diminuição e mesmo a total eliminação da água na fase de desidratação, esses ciclos são ideais para a formação de peptídeos. Diversos estudos foram realizados com diferentes temperaturas, diferentes metais, principalmente o Cu^{2+}, e minerais, assim como diferentes sais e concentrações para simular a água do mar. Esses estudos mostraram que peptídeos são formados.

Reações em solução aquosa

Vamos considerar que as "reações em ambientes hidrotermais" são aquelas nas quais a temperatura é maior que 80 °C; as outras (menor que 80 °C) chamaremos simplesmente de "reação em solução aquosa". Muitos sistemas reacionais foram estudados em solução aquosa utilizando diferentes substâncias iniciais (ácido cianídrico-HCN, formaldeído-CHO, tiocianato de amônio-NH_4SCN, ureia-$(NH_2)_2CO$ etc.), diferentes fontes de energia (calor, radiação, descarga elétrica) e diferentes condições de reações (minerais, pH, concentração de íons etc.). O sistema reacional envolvendo moléculas de ácido cianídrico merece atenção devido à grande variedade de moléculas que podem ser produzidas. O ácido cianídrico foi detectado em cometas, vulcões, hidrotermais e é formado em diversas reações envolvendo gases. Portanto, ácido cianídrico era uma substância que poderia ser comumente encontrada na Terra prebiótica. Dois mecanismos podem ter sido importantes para

a síntese de aminoácidos: um é baseado na reação de Strecker (Figura 5.5) e o outro é pelo mecanismo de Bucherer-Bergs. No mecanismo de Strecker são necessários amônia (NH_3), ácido cianídrico (HCN) e aldeídos-R-C(O)H ou cetonas-R-C(O)-R; no entanto, a amônia da atmosfera da Terra prebiótica pode ser decomposta por radiação UV e isso poderia ter sido um fator limitante para a síntese de aminoácidos. Uma alternativa para esse problema seria a síntese de aminoácidos via mecanismo Bucherer-Bergs (Figura 5.6) utilizando ureia-$(NH_2)_2CO$, ácido cianídrico e aldeídos ou cetonas. Em 1960, Joan Oró descobriu que o refluxo de cianeto de amônio (NH_4CN) por alguns dias podia gerar até 0,50% de adenina, que é uma base nitrogenada do DNA/RNA. Diversos outros compostos foram sintetizados utilizando cianeto de amônio em diversas condições de reação, como purinas, pirimidinas e aminoácidos (principalmente glicina).

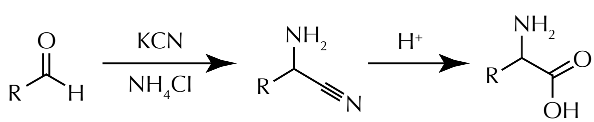


Figura 5.5. Reação de Strecker para a síntese de aminoácidos

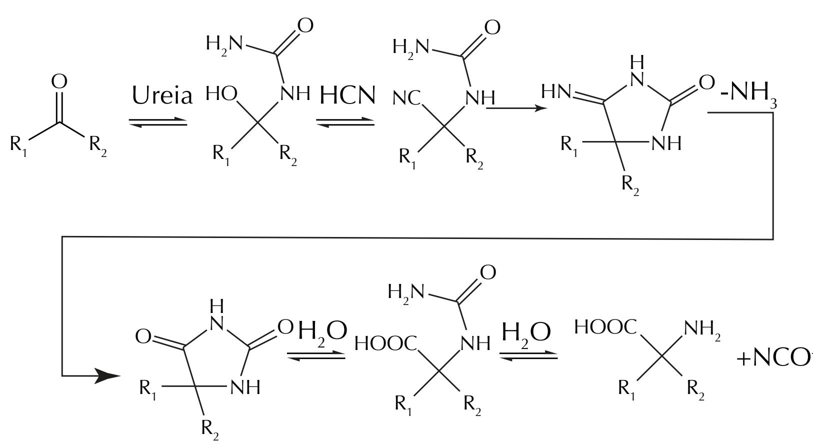


Figura 5.6. Síntese de aminoácidos pelo mecanismo de Bucherer-Bergs

Em 1979, foi feita a primeira descrição de hidrotermais, as chamadas "fumarolas negras". Essas fumarolas são causadas pelo contato da água fria do mar com lava vulcânica, ou pela penetração da água no solo submarino que entra em contato com a câmara do magma, provocando a circulação da água. A coloração dessas fumarolas é resultado do contato do sulfeto (S^{2-}) com metais, o que forma compostos de coloração negra. As fumarolas negras são ricas em metais de transição (Fe^{2+}, Mn^{2+} etc.), o pH é muito ácido (2,00-3,00), e as temperaturas podem atingir até 405 °C, com altas concentrações de CO_2 (4-215 mmol/Kg), H_2S (3-110 mmol/Kg), H_2 (0,10-50 mmol/Kg) e CH_4 (0,05-4,50 mmol/Kg).

Tabela 5.2. Síntese de aminoácido em solução aquosa usando aquecimento como fonte de energia

Mistura inicial	Temperatura	Aminoácidos
[a]Asp, Ser, Leu, Ala, pirita-pirrotita-magnetita (PPM), K-feldspato-muscovita-quartzo (KMQ)	200 ºC, 50 bar	Gly, Ala
[b]$CO_{2(g)}$, $H_{2(g)}$, KCN, NH4Cl, HCHO, HCl, NaHS, pirita-pirrotita-magnetita (PPM), Ilita	150 ºC, 10 bar	Gly, Asp, Ser, Glu, Ala, Ile, *Cys, *Met
[c]$CO_{2(g)}$, $N_{2(g)}$, $CH_{4(g)}$	260-325 ºC	Gly, Ala, Sar
[d]eritrose, formamidina, NH_4Cl, KCN,	80 ºC	His
[e,f]a-oxoácidos, NH_3	–	Gly, Ala, Phe, Glu, Sar
[g,h,i]Formaldeído, hidroxilamina, água do mar modificada	105 ºC	Gly, Ser, Homo-Ser, Asp, Ala, b-Ala, Tau, Thr, Glu, a-ABA, Val, Nor-Val, Ile, Leu, Nor-Leu; Lys, g-ABA, His Arg, Met
[j]Açúcares, NH_3, água do mar modificada	150 ºC	Gly, Ala, Ser, Thr, Asp, Glu
[k]Formaldeído, NH_3	185 ºC	Gly, Ala, Asp, Ser, Glu, Pro, Val, Ile, Phe

ABA – aminoácido n-butírico; Ala – alanina; Arg – arginina; Asp – ácido aspartico; Cys – cisteína; Glu – ácido glutâmico; Gly – glicina; His – histidina; Ile – isoleucina; Leu – leucina; Lys – lysina; Met – metionina; Nor-Leu – norleucina; Nor-Val – norvalina; Phe – phenilalanina; Pro – prolina; Sar – sarcosina; Ser – serina; Tau – taurina; Thr – treonina; Val – valina; *traço.

Em 2000, foi descoberto outro tipo de hidrotermal chamada de "Lost City Hydrothermal Field" – "Chaminé de Carbonato", na região do oceano Atlântico próxima à dorsal mesoatlântica. Nessa hidrotermal, a água do mar não entra em contato com lava vulcânica e fica a vários quilômetros de distância do eixo principal de algum vulcão. Essa hidrotermal é formada devido à penetração de água fria do mar no solo submarino que é aquecida devido à profundidade ou mesmo algum tipo de reação exotérmica. A temperatura nessa hidrotermal pode chegar a 200 °C, o pH é muito alcalino (9,00-11,00) e altas concentrações de H_2 e CH_4 são encontradas.

Ambientes hidrotermais apresentam diversas vantagens para o estudo da química prebiótica: a) no fundo do mar, as moléculas ficavam protegidas da radiação ultravioleta do Sol que poderia degradá-las; b) devido ao aquecimento e altas pressões do fundo do mar, a água possuía propriedades físicas similares às de um solvente orgânico; c) o gradiente de temperatura criava diferentes ambientes para diferentes reações; e, finalmente, d) a presença de silicatos, sais da água do mar e metais de transição poderiam catalisar as reações de formação de biomoléculas e biopolímeros.

Uma reação importante observada em experimentos simulando chaminé de carbonato foi a redução de dióxido de carbono (CO_2) por hidrogênio (H_2) formando hidrocarbonetos. Um mineral comum nesses ambientes é a olivina, $(Mg,Fe)_2SiO_4$, responsável pela formação de hidrocarbonetos. Em experimentos simulando hidrotermais, foi possível sintetizar aminoácidos, ácidos nucleicos, ácidos carboxílicos, assim como diversas outras substâncias. Devido às altas temperaturas e à dissolução dos minerais nesses ambientes liberando silicatos e metais de transição, estes são propícios para a síntese de peptídeos. Estruturas coacervadas também foram sintetizadas em experimentos simulando esses ambientes.

Minerais

Até o momento foram descobertos mais de 4.440 diferentes minerais, sendo que, todos os anos, 40 novos são encontrados.

Contudo, em experimentos de química prebiótica devem ser utilizados apenas minerais que existiam na Terra antes da origem da vida. Como a vida surgiu por volta de 3,5 a 3,8 bilhões de anos atrás, somente minerais que existiram antes disso podem ser testados. No início da formação do planeta Terra (> 4,56 bilhões de anos) havia por volta de 60 minerais, sendo alguns deles: olivinas $(Mg,Fe)_2SiO_4$), piroxênios, Fe-Ni-metal, FeS e inclusões ricas em Ca e Al (Tabela 5.3). Posteriormente, no período de > 4,56 a 4,55 bilhões de anos atrás devido a diversos processos envolvendo calor e água, assim como acareação de meteoritos, esses minerais se transformaram resultando em cerca de 250 minerais, tendo como exemplos filossilicatos, hidróxidos, sulfatos, halita, carbonatos, sulfetos com metais de transição e fosfatos (Tabela 5.3). Finalmente, devido a processos envolvendo fracionamento, vulcanismo, liberação de gases e hidratação, há 4 bilhões de anos passamos a ter entre 350 e 500 minerais, tais como: argilas, minerais, feldspatoides e hidróxidos (Tabela 5.3). Portanto, somente esses minerais são aqueles que devem ser utilizados em experimentos de química prebiótica.

Tabela 5.3. Minerais existentes na Terra antes da origem da vida

Processo de formação	Período de formação em bilhões de anos atrás	Exemplo de mineral	Número de espécies
Condritos primários	> 4,56	olivina piroxênios, Fe-Ni-metal, FeS, inclusões ricas em Ca e Al	60
Meteoros de Fe e acondritos. Alterações dos minerais por causa da água e do calor	> 4,56-4,55	filossilicatos, hidróxidos, sulfatos, halita, carbonatos, sulfetos com metais de transição, fosfatos etc.	250
Evolução das rochas ígneas	4,55-4,00	feldspatos, hidróxidos, minerais de argila	350-500
Condritos primários	> 4,56	olivina piroxênios, Fe-Ni-metal, FeS, inclusões ricas em Ca e Al	60

Como os minerais sempre existiram na Terra, devem ter desempenhado um importante papel na origem da vida no planeta. Diversos trabalhos têm demonstrado que minerais poderiam catalisar reações químicas e pré-concentrar moléculas por adsorção, protegendo-as da degradação pela radiação ultravioleta ou hidrólise. Outros papéis também podem ser atribuídos aos minerais, tais como código genético primitivo, membranas para coacervados e energia para metabolismo.

Adsorção/catálise/proteção

Uma das críticas feitas ao experimento de Miller foi que os aminoácidos, ao atingirem o mar, por causa do grande volume de água, seriam diluídos, e, em consequência, a formação de peptídeos e proteínas não ocorreria. Em 1951, John D. Bernal (1901-1971) publicou o livro *The physical basis of life*, baseado em uma palestra proferida por ele em 1947. Nesse livro Bernal propõe que minerais poderiam ter desempenhado importantes papéis na origem da vida, como de pré-concentradores de moléculas orgânicas, de proteção contra a degradação e inclusive de código genético. Diversos experimentos mostraram que minerais podem adsorver biomoléculas (aminoácidos, bases nucleicas do DNA/RNA etc.), portanto, pré-concentrá-las e, uma vez adsorvidas na superfície do mineral, essas moléculas ficariam protegidas da hidrólise e radiação ultravioleta. A adsorção das moléculas sobre minerais pode ser física (fraca, DH na faixa de –20 kJ) ou química (forte, DH na faixa de –200 kJ). No caso da adsorção física, a interação é devida à atração eletrostática, interação dipolo-dipolo ou forças de van der Waals. No caso da adsorção química, temos a formação de uma ligação química entre a molécula adsorvida e o mineral. Existem diversos trabalhos que mostram que minerais podem ter um efeito catalisador sobre uma reação química, contudo, em muitos casos ocorre participação do mineral na reação, ocasionando seu consumo.

Código genético primitivo

Em meados dos anos 1960, Alexander Graham Cairns-Smith (1931-) propôs que antes do atual código genético, que é muito

complexo, existiu um bem mais simples. Segundo Cairns-Smith, esse código genético deveria ser constituído de um material que fosse facilmente encontrado na Terra antes da origem da vida, e que de alguma forma pudesse armazenar e transmitir informação e fosse simples. Minerais são ideais para tal fim, são abundantes na natureza, sempre existiram no nosso planeta, podem crescer e se dividir (quebrar), e são estruturas organizadas que podem reter e transmitir informação. O grande problema da proposta de Cairns-Smith é que, até o momento, não existe nenhum fato experimental corroborando sua hipótese.

Membranas para coacervados

Todos os seres vivos conhecidos possuem membranas. Existem diversos minerais que possuem estruturas nas quais as moléculas podem ficar protegidas e sofrer reações. Exemplos desses minerais são as argilas 2:1 e as zeólitas (Figura 5.7). Assim, alguns minerais poderiam ter sido membranas primitivas de células.

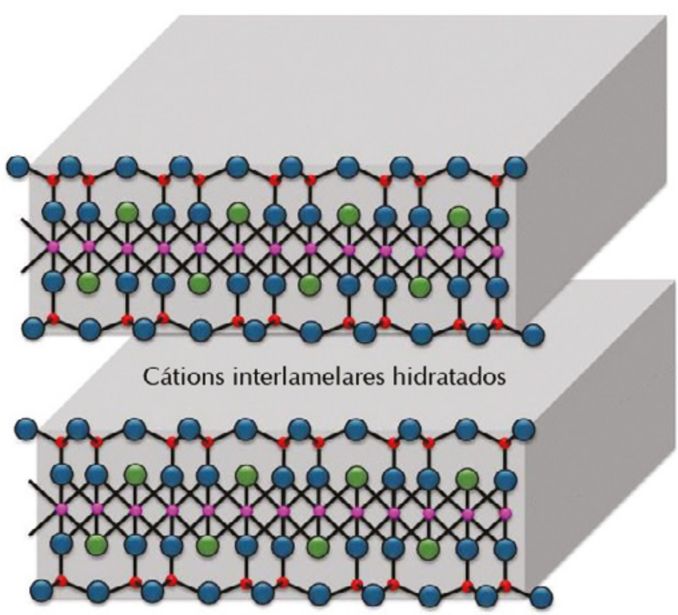


Figura 5.7. Estrutura de uma argila 2:1. Fonte: Adaptado de Nasa/JPL-Caltech/MSSS

Energia para metabolismo

Metabolismo é a maneira pela qual os seres vivos obtêm energia do meio ambiente para garantir sua sobrevivência. Podemos agrupar os seres vivos em dois tipos: autotróficos e heterotróficos. Os organismos autotróficos sintetizam todos os seus compostos orgânicos a partir de moléculas de dióxido de carbono (ou outra unidade C_1), as plantas são exemplos de tais organismos. Os organismos heterotróficos necessitam de moléculas (proteínas, lipídeos, açúcares etc.) previamente prontas para serem utilizadas posteriormente para outras sínteses; o homem é um exemplo. Em 1988, o químico alemão Günter Wächtershäuser (1938-) propôs um mecanismo de metabolismo autotrófico baseado na formação da pirita-FeS_2, também conhecida como "ouro dos tolos", devido a sua coloração amarela que é parecida com a do ouro. A fonte de energia para origem da vida quimiotrófica é fornecida pela reação a seguir:

$$FeS + H_2S = Fe\,S_2 + 2H^+ + 2e^-$$

Os elétrons fornecidos pela formação da pirita poderiam ser utilizados para a redução de CO_2. A formação do ácido succínico é um exemplo de como a reação é termodinamicamente favorável.

$$4CO_2 + 7FeS + 7H_2S = 7Fe\,S_2 + (CH_2COOH)_2 + 4H_2O \quad \Delta G° = -420\ kJ/mol$$

Portanto, reações poderiam ocorrer na superfície do mineral e isso seria um exemplo de um metabolismo primitivo.

Quiralidade e os minerais

Muitas substâncias apresentam uma propriedade chamada "quiralidade", palavra originada do grego "quiros" que significa "mão". Esse nome vem de uma característica das mãos, assim como de muitos objetos tridimensionais que formam pares assimétricos. Ou seja, uma mão é a imagem especular de outra. No caso das moléculas orgânicas, há um centro quiral, que é

quando um átomo de carbono tem ligado a ele 4 diferentes átomos. Todos os aminoácidos proteicos, com exceção da glicina, possuem um centro quiral. Dessa forma, em qualquer síntese de aminoácidos, o resultado é a chamada "mistura racêmica", ou seja, 50% de aminoácidos denominados L-aminoácidos (levógiros) e 50% de aminoácidos denominados D-aminoácidos (dextrógiros). Os D-aminoácidos desviam a luz polarizada para a direita e os L-aminoácidos para a esquerda. Contudo, em todos os seres vivos os aminoácidos são do tipo L-aminoácidos e os açúcares do tipo D-açúcares. Não é conhecida a razão dessas escolhas ou mesmo como isso ocorreu, porém alguns experimentos demonstram que minerais poderiam ter tido um importante papel na seleção de L-aminoácidos. Experimentos realizados com calcita ($CaCO_3$) mostraram que é possível separar o L-aspártico do D-aspártico pela adsorção preferencial de um aminoácido em relação ao outro, dependendo da face do mineral.

Conclusão

Depois de quase 60 anos do clássico experimento de Miller, uma grande quantidade de evidências experimentais foi acumulada pela química prebiótica, demonstrando que é possível a origem de vida a partir da matéria inanimada dentro do esquema proposto por Oparin-Haldane. Outro esquema possível seria da origem da vida por meio do metabolismo, como proposto por Wächtershäuser. Entretanto, reproduzir as condições exatas de como isso ocorreu pode ser impossível, pois há muitas incertezas sobre as condições da Terra prebiótica. Qual era a exata composição dos gases da atmosfera, dos sais da água do mar, dos precursores para a síntese das biomoléculas etc.? Qual foi o papel desempenhado por fontes terrestres e extraterrestres de precursores e moléculas para a síntese prebiótica? Todavia, o importante aqui é demonstrar que isso é possível e essa possibilidade abre perspectivas para a imaginação e engenhosidade dos pesquisadores para

propor inúmeras rotas para a origem da vida, abrindo assim um universo cheio de possibilidades de diferentes formas de vida.

Referências

Bleeker, W. et al. Mineral evolution. *American Mineralogist*, v. 93, p. 1693-1728, 2008.

Rampelotto, P. H. A química da vida como nós não conhecemos. *Química Nova*, v. 35, p. 1619-1627, 2012.

Zaia, D. A. M.; Zaia, C. T. B. V. Os cristais e a origem da vida: a seleção quiral de aminoácidos na Terra primitiva. *Ciência Hoje*, v. 37, p. 38-43, 2005.

Zaia, D. A. M.; Zaia, C. T. B. V. Algumas controvérsias sobre a origem da vida. *Química Nova,* v. 31, p. 1599-1602, 2008.

ORIGEM DA VIDA

Capítulo 6

Douglas Galante e Fabio Rodrigues

Nosso conhecimento moderno sobre a vida no planeta tem como base, em grande parte, o trabalho de Charles Robert Darwin, em especial *A origem das espécies*. Este livro é a compilação de um extenso trabalho de coleta de dados e reunião de evidências que comprovaram a ocorrência do que hoje chamamos evolução darwiniana, na qual os organismos vivos são resultado de um longo processo de modificação aleatória e herança.

Apesar de ser um dos mais importantes fatos científicos da história, comprovado por inúmeros dados experimentais, a evolução darwiniana não trata, a princípio, do problema da origem da vida em si, ao qual Darwin se refere brevemente: "[…] devo inferir por analogia que, provavelmente, todos os seres orgânicos que já viveram na Terra descendem de uma forma primordial, na qual a vida uma vez se baseou"* (Tradução nossa).

* "[…] I should infer from analogy that probably all organic beings which have ever lived on this Earth have descended from some one primordial form, into which life was first breathed."

Darwin volta a essa questão em uma carta a seu amigo Joseph Dalton Hooker, datada de 1 de fevereiro de 1871, no célebre parágrafo:

> "[...] é comumente dito que todas as condições para a primeira produção de um ser vivo estão presentes agora, e podem ter sempre estado presentes. Mas se (e, oh, um grande *se*) nós pudéssemos conceber, em uma pequena poça quente, com todo tipo de sais de amônia e sais fosfóricos – com luz, calor, eletricidade etc. presentes –, que um composto proteico se formasse, pronto para sofrer mudanças ainda mais complexas, no presente ele seria rapidamente devorado ou absorvido, o que não teria sido o caso antes das criaturas vivas terem se formado"** (Tradução nossa).

Ou seja, Darwin concebia um cenário químico na Terra primitiva para a origem da vida, gradual e envolvendo o aumento de complexidade, e sabia que esse poderia ser o ponto de partida para a Evolução, porém deixou claro que o processo de origem ainda não era claro, mas que deve ter ocorrido ao menos uma vez na Terra, ou fora dela. Há discussões se a vida surgiu mais de uma vez em nosso planeta, de maneira independente e com diferentes características, mas, pelo que observamos hoje, mesmo que isso tenha acontecido, apenas uma forma de vida sobreviveu, e, mesmo que eventos de origem estivessem acontecendo agora, esses novos seres provavelmente seriam rapidamente devorados pelos organismos existentes e já bem adaptados ao ambiente.

Na verdade, a busca pela origem da vida é muito mais antiga que Darwin, estando intimamente ligada à compreensão de nosso

** "[...] it is often said that all the conditions for the first production of a living being are now present, which could ever have been present. But if (and oh what a big if) we could conceive in some warm little pond with all sort of ammonia and phosphoric salts, – light, heat, electricity present, that a protein compound was chemically formed, ready to undergo still more complex changes, at the present such matter would be instantly devoured, or absorbed, which would not have been the case before living creatures were formed."

lugar no mundo. Praticamente todas as civilizações humanas possuem mitos de cosmogonia, os quais tentam explicar a origem do Universo e dos seres vivos.

No Ocidente, a mitologia grega é repleta de histórias de criação, baseadas em seu panteão de deuses. Essas histórias foram compiladas por volta do ano 700 a.C. por Hesíodo e descreviam o nascimento dos deuses e, posteriormente, da humanidade, a partir do caos primordial. Posteriormente, Aristóteles (384-322 a.C.) foi um dos primeiros pensadores a formular uma teoria natural sobre a origem da vida, na qual organismos vivos complexos poderiam surgir a partir de matéria inanimada – pulgões a partir do orvalho de plantas, moscas de matéria em estado de putrefação, ratos de feno, crocodilos de toras podres etc. Essas ideias, uma forma primitiva da teoria de abiogênese, foram popularizadas e cristalizadas no pensamento ocidental, permanecendo, com os mitos criacionistas religiosos, como o modelo padrão para a origem da vida.

No entanto, os avanços técnicos no século XVII e o desenvolvimento da ciência experimental aumentaram o conhecimento sobre os mecanismos de funcionamento da vida e iniciaram uma série de críticas ao senso comum e ao mito popular em torno da abiogênese. A descoberta do mundo microscópico, incluindo suas formas de vida, impulsionou esse conhecimento e foi possível graças ao desenvolvimento do microscópio ótico por Robert Hooke. Seu trabalho resultou na publicação dos primeiros desenhos de objetos de escala microscópica, em 1665, em especial, a primeira identificação de que os organismos vivos são compostos de células, termo cunhado pelo próprio Hooke (Figura 6.1). Anton van Leeuwenhoek continuou seu trabalho e fez os primeiros desenhos de micro-organismos, mostrando que a vida estava presente mesmo nessas escalas. No entanto, a observação de micro-organismos ainda deixava espaço para a interpretação abiogênica, uma vez que não se compreendia corretamente a reprodução desses seres, que pareciam surgir da matéria inanimada, enquanto estavam realizando reprodução assexuada.

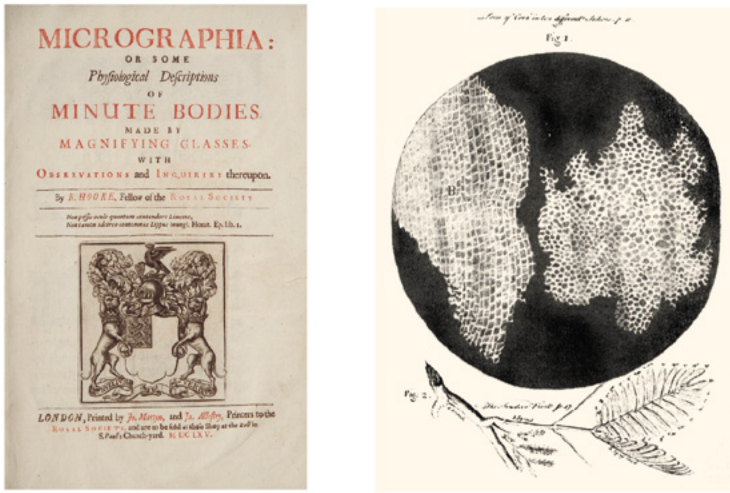


Figura 6.1. Livro contendo as primeiras imagens microscópicas publicadas, feitas com o microscópio desenvolvido por Hooke. À direita está representado seu desenho da cortiça, com a primeira descrição das células biológicas. Fonte: http://catalogue.wellcomelibrary.org/

A primeira evidência sólida contra a geração espontânea viria alguns anos depois, em 1668, com os famosos experimentos feitos por Francesco Redi, os quais demonstraram que as larvas que cresciam na carne não surgiam espontaneamente, como se acreditava, mas eram resultado de moscas terem depositado ovos no alimento desprotegido. A conclusão, tida como geral na época, é que toda a vida precedia de vida, ou seja, a teoria da biogênese.

Lazzaro Spallanzani, na Itália, em 1768, mostrou que micro-organismos estavam presentes no ar e que podiam ser eliminados com a fervura da água, abrindo caminho para o trabalho de Louis Pasteur. Na França do século XIX, Pasteur conduziu uma série de experimentos que demonstraram que os micro-organismos responsáveis pela fermentação e degradação de alimentos, como leite e cerveja, provinham de contaminação do ambiente. Uma vez que essa contaminação era evitada, o alimento mantinha-se intacto, e essa foi tida como uma das mais fortes demonstrações de que o processo de geração espontânea, ou abiogênese, não ocorria.

Juntamente com o alemão Robert Koch, Pasteur foi considerado o pai da microbiologia, fornecendo os subsídios para diversos processos de esterilização e assepsia, o que impulsionou ramos da preservação de alimentos e da medicina. Desse momento em diante, a microbiologia desenvolveu-se rapidamente para desvendar a riqueza de uma biodiversidade antes desconhecida de nosso planeta, baseando-se no princípio de que a vida precede de vida. A teoria da origem abiótica parecia descartada.

No entanto, uma vez que sabemos que nosso planeta não é eterno, tendo se formado há cerca de 4,6 bilhões de anos (Patterson, 1956), não podemos estender o conceito da biogênese indefinidamente ao passado – em algum momento, deve ter ocorrido um evento singular, no qual o primeiro ser vivo se formou, e do qual todos os outros seres seriam descendentes. Uma alternativa a essa lógica é a teoria da panspermia (Melosh, 1988), que coloca como possibilidade a vida em nosso planeta ter tido origem extraterrestre, podendo assim ser mais antiga que a própria Terra, mas não eliminando a necessidade de ter surgido em algum ponto do Universo, uma vez que também passou por um processo evolutivo, não tendo sido sempre capaz de abrigar seres vivos. Essa teoria foi adotada por diversos cientistas ao longo da história, incluindo Hermann von Helmoltz (pela sua teoria de "cosmozoa" – micróbios vindo do espaço), Lord Kelvin, um grande opositor da teoria evolucionista, e, mais recentemente, Fred Hoyle e Chandra Wickramasinghe (1999). Até o momento, não há nenhum evidência comprovada de que esse fenômeno de fato ocorre, apesar de vários experimentos mostrarem que micro-organismos seriam capazes de sobreviver a uma viagem espacial (Abrevaya, 2011).

Com a limitação da teoria da biogênese, requerendo ao menos um ponto singular no tempo e espaço (a própria origem da vida), seja na Terra ou fora dela, a teoria abiótica voltou a ser considerada pela ciência moderna. A visão transformista, na qual a matéria não viva tem chances de se tornar viva, pode ser ligada a Erasmus Darwin, Georges Louis Leclerc conde de Buffon e, especialmente,

Jean-Baptiste de Lamarck, o qual, em 1809, já propunha um processo de geração espontânea físico-químico, usando os nutrientes e fontes de energia disponíveis na Terra primitiva (Lazcano, 2010). Darwin se baseou nas ideias de seus predecessores, culminando com o conceito de "sopa primordial" descrito em sua carta a Hooker. No entanto, a ausência de maiores tentativas de explicar a origem da vida por Darwin espantou muitos de seus amigos e seguidores, como Haeckel, que apontou essa como uma das maiores falhas em *A origem das espécies* (Haeckel, 1862). Apesar disso, o conceito exposto por Darwin de uma origem química e gradual da vida formou a base para os estudos posteriores.

O desenvolvimento paralelo da área da química orgânica, no início do século XIX, forneceu os subsídios para o estudo da química prebiótica. No entanto, Berlezius, um de seus fundadores, afirmou em 1827 que não seria possível combinar matéria inorgânica de maneira a criar a matéria viva. Apesar disso, um ano após essa afirmação, seu amigo e antigo aluno Friedrich Wöhler mostrou que a ureia (componente da urina) poderia se formar pelo simples aquecimento de cianeto de amônia, em um processo totalmente abiótico, "sem a presença de um rim animal" (Leicester, 1974). Uma nova área de pesquisa havia nascido. Em 1850, Adolph Strecker sintetizou alanina, um aminoácido, a base das proteínas, e, posteriormente, Alexander M. Butlerov sintetizou açúcares, a base dos carboidratos e principal fonte de energia dos seres vivos.

Moléculas orgânicas ainda mais complexas foram sintetizadas com o tempo. Em 1877, Mendeleyeev foi capaz de formar hidrocarbonetos a partir de precursores simples, mostrando a origem de lipídios. Ao final do século XIX, muitos experimentos já mostravam a possibilidade de síntese de ácidos graxos e açúcares por meio de descargas elétricas em misturas gasosas. No início do século XX, Walther Löb, Oskar Baudisch e outros descreveram a síntese de aminoácidos a partir de formamida e água sob luz ultravioleta e descargas elétricas (Bada; Lazcano, 2003). Esses experimentos, no entanto, não eram realizados com o intuito de simular as

condições descritas por Darwin, de Terra primitiva, mas eram um esforço puro para a compreensão da química dessas reações.

Em novembro de 1923, a teoria da síntese química da vida, em um cenário realista, é revisitada pelo russo Aleksandr Ivanovich Oparin, com a publicação do livro *A origem da vida*. Para o biólogo e químico russo, a geração espontânea combatida por Pasteur e seus predecessores de fato não poderia acontecer nas condições atuais no planeta, mas deve ter sido possível ao menos uma vez no passado, quando as características físico-químicas eram tais que a sopa primordial proposta por Darwin poderia ter se formado. A proposta era que seria necessário uma atmosfera sem oxigênio – na verdade, essa hipótese só é incluída na segunda edição de seu livro (Oparin, 1938) – combinada à ação da luz solar, o que provocaria reações que não apenas gerariam moléculas orgânicas, mas induziriam sua complexificação até que se formassem coacervados, ou seja, aglomerados proteicos que seriam capazes de se reproduzir de maneira primitiva por fissão, tendo assim um metabolismo primitivo que garantiria sua continuidade e diversificação. Em 1929, antes da tradução do trabalho de Oparin para o inglês, John Burdon Sanderson Haldane publicou uma teoria análoga, na qual os oceanos primitivos funcionaram como uma sopa quente e diluída, onde a matéria viva evoluiu a partir de moléculas autorreplicantes.

Alguns anos depois, em 1953, Stanley Miller, aluno de Harvey Urey na Universidade de Chicago, realizou um experimento baseado nas ideias de Oparin e Haldane, simulando uma atmosfera redutora como se acreditava ser a da Terra primitiva, tendo como fonte de energia descargas elétricas – experimento que ficou conhecido como o de Miller-Urey (Figura 6.2A). Depois de uma semana em funcionamento, o grupo reportou a produção de aminoácidos de forma completamente abiótica (Miller, 1953) (Figura 6.2B), e, em uma reanálise das amostras feitas em 2007, com técnicas modernas, após a morte de Miller, mostrou-se que mais de 20 tipos dessas moléculas básicas da vida haviam sido produzidas (Johnson, 2008). Pela primeira vez, um experimento havia

sido desenhado explicitamente para tentar simular as condições de Terra primitiva, e obtido, com sucesso, moléculas tidas como biológicas. Foi um marco importante para a química prebiótica, a qual iniciou uma nova fase experimental.

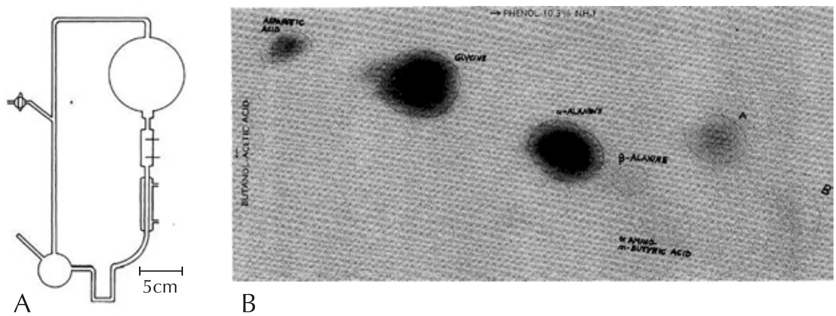


Figura 6.2. (A) Modelo do reator de descargas elétricas usado no experimento de Miller-Urey e (B) resultados originais de cromatografia em papel separando alguns dos aminoácidos produzidos após uma semana de simulação (Miller, 1953)

No entanto, o experimento de Miller usou uma atmosfera que hoje sabemos não ser a melhor análoga à atmosfera primitiva global terrestre, que deve ter tido uma composição menos redutora (Kasting, 1993). Em condições mais realistas, o experimento não produz as moléculas prebióticas. No entanto, vários cenários alternativos foram propostos na Terra primitiva, quando a presença de gases redutores poderiam promover as reações químicas necessárias para a produção dos aminoácidos, como os gases expelidos em erupções vulcânicas, as chamadas "plumas vulcânicas" (Parker et al., 2011). Dessa maneira, é possível que, em alguns pontos do planeta, verdadeiros reatores estivessem em funcionamento, produzindo moléculas que, mais tarde, se complexificariam até o ponto de formar sistemas vivos.

Sabemos que a vida como a conhecemos é composta de macromoléculas, ou seja, grandes moléculas formadas por subunidades menores. Alguns exemplos são os ácidos nucleicos, formados por nucleotídeos; as proteínas, formadas por aminoácidos e os carboidratos, formados por açúcares. A passagem de monômeros para

polímeros é essencial para a função dessas diferentes macromoléculas, pois a sequência dos monômeros define a conformação tridimensional (que define a atividade catalítica das enzimas, por exemplo) e a informação que ali está armazenada (no caso dos ácidos nucleicos). Sidney Fox mostrou que essa passagem é possível em diferentes condições, realizando, nos anos 1950 e 1960, uma série de experimentos na qual revelou que aminoácidos, quando secos a partir de uma solução ou aquecidos, poderiam se combinar em estruturas maiores, às vezes lineares, às vezes globulares, que ele chamou de "proteinoides", os quais acreditava serem os precursores das células atuais (Fox, 1960; Fox; Dose, 1979).

O cenário científico até o momento caminhava para um consenso de que as moléculas básicas para a vida poderiam se formar por reações químicas simples, em um cenário análogo ao existente na Terra primitiva. Uma alternativa é que essas mesmas moléculas poderiam se formar no ambiente espacial e serem trazidas para a Terra por cometas e meteoros. Cálculos mostram que a quantidade de material orgânico produzido na Terra e trazido de fora dela podem ter sido equivalentes (Chyba; Sagan, 1992), e, provavelmente, ambos os processos aconteceram simultaneamente e de maneira complementar. Essas moléculas, em um ambiente propício no planeta, poderiam formar estruturas mais complexas, mas a partir de que ponto podemos dizer que um sistema químico se torna vivo?

Se queremos compreender o processo de origem da vida, precisamos definir corretamente o problema. Queremos saber a origem do *Homo sapiens*? A ciência já conseguiu desvendar a rota de nossos ancestrais saindo da África e colonizando o planeta (Underhill, 2001). A origem dos animais? Os fósseis mostram uma explosão de vida há cerca de 550 milhões de anos, conhecida como Explosão do Cambriano (Bowring et al., 1993). Quando pensamos na origem da vida, estamos falando da origem de todo sistema que pode ser dito como vivo, o que é uma definição circular que deve ser mais esclarecida. Na verdade, há diferentes definições de vida disponíveis, feitas por cientistas e filósofos (Luisi, 1998; Gayon, 2010). No entanto, não há um consenso ou uma

definição perfeita, cada uma tem suas falhas ou limitações, funcionando bem em alguns casos e falhando em outros (Lazcano, 2010; Tirard; Morange; Lazcano, 2010).

Historicamente, podemos referenciar uma das primeiras tentativas modernas de definição de vida à publicação do livro *O que é vida?* de Erwin Rudolf Josef Alexander Schrödinger, em 1944. O livro foi escrito após uma série de palestras públicas de Schrödinger em 1943 na Trinity College, Dublin, que tinham o principal objetivo de relacionar o evento de origem da vida com as condições físicas e químicas existentes naquele momento, propondo que a origem tenha sido uma decorrência do estado do planeta. O livro introduz ainda a ideia de um cristal aperiódico que continha a informação genética armazenada pelas diferentes configurações de ligações químicas, o que estimulou a busca para desvendar a estrutura química do DNA (ácido desoxirribonucleico, macromolécula biológica), sendo por isso considerado a base para o desenvolvimento dos fundamentos moleculares da vida, ou, simplesmente, biologia molecular.

Apesar de a existência do DNA ser conhecida desde o século XIX – isolado inicialmente, associado a proteínas e chamado de "nucleína" por Friedrich Miescher em 1869 (Dahm, 2008) –, seu papel na reprodução e sua estrutura helicoidal ainda não estavam definidos quando Schrödinger propôs essas ideias. Gregor Mendel já havia estabelecido os princípios da hereditariedade genética em 1865 (Mendel, 1865), que foi demonstrada estar associada aos cromossomos em 1915, no que ficou conhecido como a teoria dos cromossomos de Boveri-Sutton (Morgan, 1915; Sutton, 1903). A composição química dessas entidades foi sendo desvendada gradativamente ao longo dos anos, porém, sua estrutura tridimensional, que era a chave para o processo de codificação da informação genética, ainda era desconhecida e dependeria do avanço das técnicas de imageamento em nível molecular. Em 1953, James Dewey Watson e Francis Crick publicam um artigo na revista *Nature* com a proposta da estrutura tridimensional do DNA (Watson; Crick, 1953), construída baseada na imagem feita pela

técnica de difração de raios X por Rosalind Franklin um ano antes (Franklin; Gosling, 1953) (Figura 6.3).

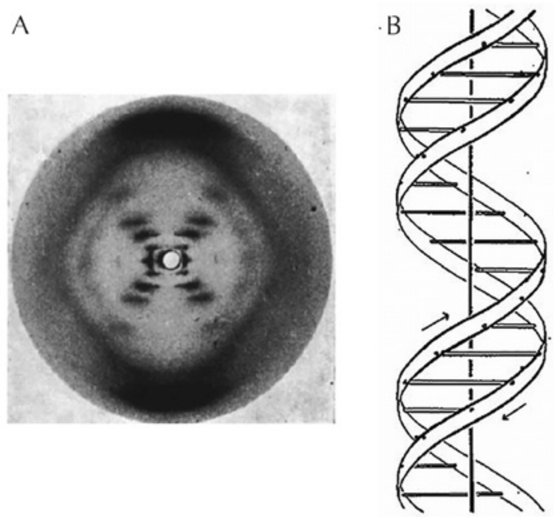


Figura 6.3. (A) Imagem de difração de raio X de um cristal de DNA, conhecida como "Foto 51", feita por Rosalind Franklin em 1952, que baseou a determinação da estrutura da molécula (B) por Watson e Crick (1953). Fonte: Special Collections & Archives Research Center, Oregon State University Libraries

A descrição da estrutura do DNA permitiu que o mecanismo de codificação genético fosse compreendido, resultando em um período de grande desenvolvimento na biologia molecular (que perdura até hoje), o que proporcionou o estudo dos mecanismos mais fundamentais de funcionamento dos organismos vivos. Definir uma separação clara entre vida e não vida deixou de ser uma prioridade, uma vez que muitos cientistas da época acreditavam que os fundamentos da vida pareciam repousar no DNA, e que seria possível compreender a vida conhecendo os princípios físico-químicos da natureza.

No entanto, a definição de vida continua voltando ao cenário científico e provocando intensos debates em questões atuais, como a origem das estruturas microscópicas no meteorito

marciano Allan Hills 84001 (McKay et al., 1996), a questão se vírus são vivos ou não, e os recentes desenvolvimentos da biologia sintética, em especial a síntese completa de um genoma bacteriano e sua incorporação na estrutura de uma microbactéria (bactéria do gênero *Mycoplasma*, com cerca de 0.3 mm, menor que a maioria das bactérias), em pesquisa desenvolvida no Instituto J. Craig Venter (Gibson et al., 2010; Bedau et al., 2010), em um estudo em andamento que almeja não apenas a compreensão das funções mínimas necessárias à vida, mas o desenvolvimento de técnicas que permitam o *design* de organismos vivos completos (micro-organismos) com as características que desejamos. Esses estudos, por exemplo, podem possibilitar a criação de organismos sintéticos capazes de produzir medicamentos, insumos ou combater outros micro-organismos patogênicos, promovendo alguns dos maiores avanços médicos e tecnológicos dos próximos anos ou décadas.

Apesar dos esforços e avanços científicos, ainda não somos capazes de elaborar uma definição única e completa de vida. Entre o século XVIII e a primeira metade do século XX, grande parte dos naturalistas e biólogos mais influentes do mundo discutiram a origem e evolução da vida sem uma definição precisa, baseando-se em concepções de senso comum, incluindo descrições fenomenológicas e conceitos intuitivos (Tirard, 2010). Talvez seja mesmo impossível formular uma definição totalmente precisa de vida – Kant já afirmava que definições precisas são possíveis na filosofia e matemática, mas conceitos empíricos só podem ser explicitados através de descrições, as quais dependem do momento histórico (Fry, 2000). Nietzsche também compartilhava da opinião que há alguns conceitos que podem ser definidos, enquanto outros apenas têm uma história (Lazcano, 2008). Ainda não sabemos ao certo em qual categoria se enquadra a definição de vida, mas os esforços nessa busca aumentam nosso conhecimento de mundo. Além disso, a definição de vida tem implicações que vão além da discussão científica e filosófica, estendendo-se, por exemplo, na área jurídica, social e política, com implicações para qualificar aborto, eutanásia, organismos transgênicos e uso de células-tronco embrionárias.

Uma das definições mais usadas, porém não necessariamente a definitiva – vida é um sistema químico autossustentado, capaz de sofrer evolução darwiniana – é usada como definição oficial de vida da Nasa, porém, muitas vezes é genérica demais. Podemos simplificar a vida como a conhecemos no planeta em três características básicas:

1. Compartimentalização: todo organismo vivo possui uma maneira de se separar do meio que o circunda. As células usam membranas lipídicas; os vírus, capsídeos proteicos. Essa membrana tem diversos papéis, mas o mais básico de todos é o de concentrar, em seu interior, as moléculas necessárias para seu funcionamento;
2. Informação: o organismo vivo deve possuir, em si, toda a informação necessária para sua manutenção e continuidade, portanto, para se perpetuar e reproduzir;
3. Metabolismo: o organismo vivo deve ser capaz de realizar as reações químicas necessárias para garantir sua sobrevivência e reprodução. Essa característica não está completamente presente nos vírus, que usam outros organismos como hospedeiros para realizar essas funções (motivo da controvérsia se vírus estão ou não vivos), o que indica que vírus e células provavelmente coevoluiram durante a história da Terra.

Essas características são todas encontradas nas células atuais, porém há discussões sobre a ordem de seu aparecimento na história do planeta, sem um consenso. É possível mesmo que elas tenham evoluído de maneira simultânea e paralela, até que tenha ocorrido um momento de integração. As primeiras tentativas de explicar o processo de compartimentalização usaram a formação de coacervados, aglomerados proteicos que podem ocorrer de maneira simples a partir de uma mistura de aminoácidos. Posteriormente, os estudos nessa área concentraram-se em outros tipos de moléculas, em especial as com características anfifílicas – uma de suas extremidades é hidrofílica (tendo forte interação com água e outros

solventes polares) e a outra é hidrofóbica (apolar, repelindo água). Um exemplo desse tipo de molécula são os fosfolipídios, como os que constituem as membranas da maioria das células. Quando essas moléculas são colocadas em água, ou outro solvente polar, sua parte hidrofóbica procura evitar o contato com as moléculas de água, e elas se auto-organizam, de maneira que as partes hidrofílicas ficam expostas ao solvente e as partes hidrofóbicas ficam empacotadas – formam-se assim micelas, bicamadas e vesículas ou lipossomos (esferas ocas formadas pelo dobramento de bicamadas). Essa característica de auto-organização e autocompartimentalização dos fosfolipídios pode ter sido fundamental no processo de formação das primeiras protocélulas do planeta. Na verdade, esse processo é tão simples e robusto que já foi demonstrado que moléculas anfifílicas presentes no meteorito de Murchinson (formadas junto com o Sistema Solar, ou mesmo antes dele, na nuvem que lhe deu origem, há mais de 4,6 bilhões de anos), quando extraídas da rocha e colocadas em água, prontamente formavam vesículas (Deamer, 1985), como mostrado na Figura 6.4.

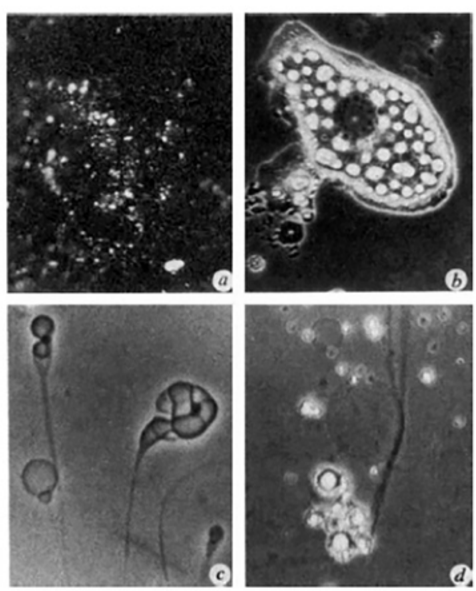


Figura 6.4. Formação de membranas, micelas e vesículas a partir de moléculas extraídas do meteorito de Murchinson (Deamer, 1985)

Nesse processo de autocompartimentalização, moléculas presentes na solução são normalmente arrastadas para o interior da micela ou vesícula, que poderão então sofrer reações diferentes das que sofreriam fora, em um ambiente mais diluído. Essa pode ter sido a maneira com que as primeiras moléculas informacionais se associaram às vesículas (Figura 6.5).

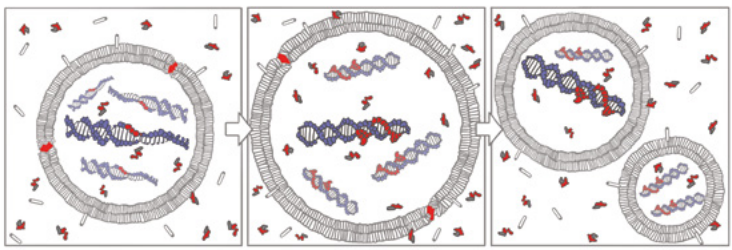


Figura 6.5. Modelo de protocélula capaz de compartimentalizar e reproduzir material genético, além de si própria, talvez um análogo ao primeiro ser vivo do planeta. Fonte: Adaptado de Mansy et al. (2008) | Ilustração: Vitor Teixeira

Atualmente, as moléculas usadas por todos os seres vivos conhecidos, de vírus aos maiores mamíferos, para armazenarem, processarem e transmitirem informação genética são os ácidos nucleicos, DNA e RNA. A existência de um sistema único, utilizando um mesmo código químico, faz que a maioria dos cientistas acreditem que todos os seres vivos atuais descendam de um ancestral comum, o LUCA (*Last Universal Common Ancestral*) (Koonin, 2003). O LUCA está, em termos genéticos, na raiz da árvore filogenética mostrada na Figura 6.6 (construída comparando-se a sequência de RNA ribossomal de diferentes espécies) e Figura 6.7. No entanto, é importante notar que a árvore mostrada na figura é baseada em dados genéticos de organismos modernos; portanto, apenas nos mostra uma indicação de parentesco entre eles, dizendo pouco sobre as características reais do LUCA. De fato, suas características genéticas e fenotípicas (características físicas decorrentes da expressão da informação genética) podem ter sido muito diferentes dos seres

atuais, sendo uma das áreas extremamente ativas das pesquisas sobre a origem da vida e a tentativa de desvendá-la.

Mesmo que cheguemos a conhecer melhor o LUCA, isso não quer dizer que tenhamos compreendido a origem da vida, pois ele não é, necessariamente, o primeiro ser vivo do planeta, apenas aquele do qual divergiram as outras espécies. Pode ter ocorrido um longo processo de evolução anterior ao LUCA, desde nosso primeiro ancestral.

A demonstração de que moléculas de RNA poderiam ter atividade catalítica, ou seja, poderiam promover reações químicas (Cech; Bass, 1986) e, em especial, poderiam catalisar reações de cópia de si mesma (autocatálise) (Johnston et al., 2001), fortaleceu a hipótese mais aceita atualmente na literatura para o cenário molecular de origem da vida, conhecida como o Mundo de RNA (Orgel, 2004). Nessa teoria de simplicidade elegante, o primeiro sistema autorreplicante que irá iniciar um processo de evolução darwiniana foi uma molécula de RNA, que pode ter se associado a uma vesícula preexistente e se diversificado em todas as formas de vida como as conhecemos.

Atualmente talvez estejamos chegando próximos de compreender o momento de origem da vida em laboratório, seja partindo dos elementos mais simples e reconstruindo quimicamente um sistema até que ele tenha as propriedades da vida (Szostak; Bartel; Luisi, 2001), abordagem conhecida como *bottom-up*, seja partindo de uma célula completa e pequena, eliminando os genes aparentemente desnecessários até se encontrar o sistema mais simples possível (Gibson et al., 2010), conhecido como abordagem *top-down*. No entanto, devemos ser cautelosos ao fazer afirmações imperativas, pois diversas outras vezes na história da ciência acreditamos estar muito próximos da resposta definitiva para a origem da vida, para apenas descobrirmos que a direção correta era outra. Esse tem sido um processo cíclico que tem nos ensinado muito sobre como a vida de nosso planeta surgiu e evoluiu, estimulando-nos a pensar na possibilidade de que tal evento poder ter acontecido em

outros pontos do Universo, onde as condições físico-químicas fossem favoráveis.

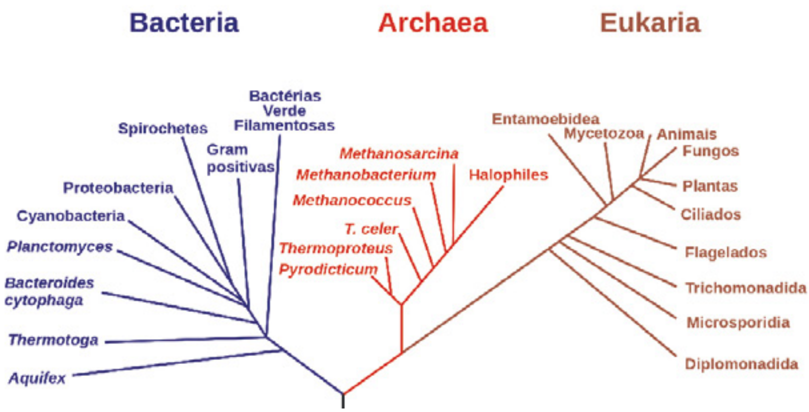


Figura 6.6. Árvore filogenética da biodiversidade terrestre, mostrando os três grandes reinos (*Bacteria*, *Archae* e *Eukarya*), todos ligados a uma raiz comum (Pace, 1997) (Creative Commons)

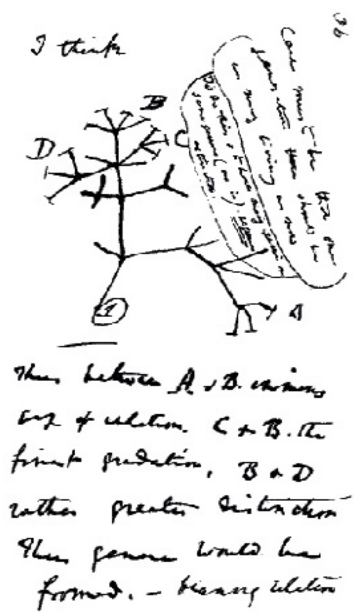


Figura 6.7. Rascunho da primeira árvore evolutiva feita por Darwin em seu caderno de anotações, em 1837

Referências

Abrevaya, X. C. et al. Comparative survival analysis of *Deinococcus radiodurans* and the *Haloarchaea Natrialba magadii* and *Haloferax volcanii* exposed to vacuum ultraviolet irradiation. *Astrobiology*, v. 11, n. 10, 2011.

Bada, J. L.; Lazcano, A. Prebiotic soup – revisiting the Miller experiment. *Science*, v. 300, n. 5620, p. 745-746, 2003.

Bedau, M. et al. Life after the synthetic cell. *Nature*, v. 465, n. 7297, p. 422-424, 2010.

Bowring, S. A. et al. Calibrating rates of early Cambrian evolution. *Science*, v. 261, n. 5126, p. 1293-1298, 1993.

Brock, T. D. *Robert Koch, a life in medicine and bacteriology*. Nova York: Scientific Tech. Publisher, 1988.

Cech, T. R.; Bass, B. L. Biological catalysis by rna. *Annual Review of Biochemistry*, v. 55, p. 599-629, 1986.

Chyba, C.; Sagan, C. Endogenous production, exogenous delivery and impact-shock synthesis of organic-molecules – an inventory for the origins of life. *Nature*, v. 355, n. 6356, p. 125-132, 1992.

Dahm, R. Discovering dna: Friedrich Miescher and the early years of nucleic acid research. *Human Genetics*, v. 122, n. 6, p. 565-581, 2008.

Darwin, C. R. *On the origin of species by means of natural selection, or the preservation of favoured races in the struggle for life*. Londres: John Murray, 1859. Disponível em: http://darwin-online.org.uk/converted/published/1859_Origin_F373/1859_Origin_F373.html. Acesso em: 5 nov. 2015.

Darwin Correspondence Project. Disponível em: http://www.darwinproject.ac.uk. Acesso em: 5 nov. 2015.

Fox, S. W. How did life begin? *Science*, v. 132, n. 3421, p. 200-208, 1960.

FOX, S. W.; DOSE, K. Molecular evolution and the origin of life. *Journal of Basic Microbiology*, v. 19, n. 6, p. 444, 1979.

FRANKLIN, R. E.; GOSLING, R. G. Molecular configuration in sodium thymonucleate. *Nature*, v. 171, n. 4356, p. 740-741, 1953.

FRY, I. *The emergence of life on Earth:* a historical and scientific overview. New Brunswick, N.J.: Rutgers University Press, 2000.

GAYON, J. Defining life: synthesis and conclusions. *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, v. 40, n. 2, p. 231-244, 2010.

GIBSON, D. G. et al. Creation of a bacterial cell controlled by a chemically synthesized genome. *Science*, v. 329, n. 5987, p. 52-56, 2010.

HAECKEL, E. *Die Radiolarien (Rhizopoda Radiaria)*; eine Monographie. Berlim: Druck und Verlag von Georg Reimer, 1862. Disponível em: http://digi.ub.uni-heidelberg.de/diglit/haeckel1862bd1_1/0149. Acesso em: 5 nov. 2015.

HALDANE, J. B. S. The origin of life. *Rationalist Annual*, v. 148, p. 3-10, 1929.

HESÍODO. *Teogonia*: a origem dos deuses. Trad. Jaa Torrano. São Paulo: Iluminuras, 2006.

HOOKE, R. *Micrographia or some physiological descriptions of minute bodies made by magnifying glasses*: with observations and inquiries thereupon. Londres: J. Martyn and J. Allestry, 1665. Disponível em: http://www.biodiversitylibrary.org/item/15485#page/1/mode/1up. Acesso em: 5 nov. 2015.

HOYLE, F.; WICKRAMASINGHE, N. C. Comets – a vehicle for panspermia. *Astrophysics and Space Science*, v. 268, n. 1, p. 333-341, 1999.

JOHNSTON, W. K. et al. RNA-catalyzed RNA polymerization: accurate and general RNA-templated primer extension. *Science*, v. 292, n. 5520, p. 1319-1325, 2001.

JOHNSON, A. P. et al. The Miller volcanic spark discharge experiment. *Science*, v. 322, n. 5900, p. 404, 2008.

KASTING, J. F. Earth's early atmosphere. *Science*, v. 259, n. 5097, p. 920-926, 1993.

KOONIN, E. V. Comparative genomics, minimal gene-sets and the last universal common ancestor. *Nature Reviews Microbiology*, v. 1, n. 2, p. 127-136, 2003.

KRUIF, P. *Microbe hunters*. San Diego: Harcourt Brace, 1996.

LAZCANO, A. What is life? *Chemistry & Biodiversity*, v. 5, n. 1, p. 1-15, 2008.

LAZCANO, A. Historical development of origins research. *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology*, v. 2, n. 11, 2010.

LEICESTER, H. M. *Development of biochemical concepts from ancient to modern times*. Massachusetts e Londres: Harvard University Press, 1974.

LENNOX, J. G. *Aristotl's philosophy of Biology:* studies in the origins of life science. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.

LUISI, P. L. About various definitions of life. *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, v. 28, n. 4-6, p. 613-622, 1998.

MANSY, S. S. et al. Template-directed synthesis of a genetic polymer in a model protocell. *Nature*, v. 454, n. 7200, p. 122-125, 2008.

MCKAY, D. S. et al. Search for past life on Mars: possible relic biogenic activity in Martian meteorite ALH84001. *Science*, v. 273, n. 5277, p. 924-930, 1996.

MELOSH, H. J. The rocky road to panspermia. *Nature*, v. 332, n. 6166, p. 687-688, 1988.

MENDEL, G. *Experiments in Plant Hybridization* (1865). Disponível em: http://www.mendelweb.org/Mendel.html. Acesso em: 15 out. 2011.

MILEIKOWSKY, C. et al. Natural transfer of viable microbes in space. *Icarus*, v. 145, n. 2, p. 391-427, 2000.

MILLER, S. L. A production of amino acids under possible primitive Earth conditions. *Science*, v. 117, n. 3046, p. 528-529, 1953.

MORGAN, T. H. The role of the environment in the realization of a sex-linked Mendelian character in Drosophila. *The American Naturalist*, v. 49, 1915.

NICHOLSON, W. L. et al. Resistance of Bacillus endospores to extreme terrestrial and extraterrestrial environments. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, v. 64, n. 3, p. 548-572, 2000.

OPARIN, A. I. *The origin of life*. Trad. S. Margolis. Nova York: Macmillan, 1938.

ORGEL, L. E. Prebiotic chemistry and the origin of the RNA world. *Critical Reviews in Biochemistry and Molecular Biology*, v. 39, n. 2, p. 99-123, 2004.

PACE, N. R. A molecular view of microbial diversity and the biosphere. *Science*, v. 276, n. 5313, p. 734-740, 1997.

PARKER, E. T. et al. Primordial synthesis of amines and amino acids in a 1958 Miller H2S-rich spark discharge experiment. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 108, n. 14, p. 5526-5531, 2011.

PATTERSON, C. Age of meteorites and the Earth. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 10, n. 4, p. 230-237, 1956.

PAULINO-LIMA, I. G. et al. Laboratory simulation of interplanetary ultraviolet radiation (broad spectrum) and its effects on Deinococcus radiodurans. *Planetary and Space Science*, v. 58, n. 10, p. 1180-1187, 2010.

REDI, F.; BIGELOW, R. P. *Experiments on the generation of insects*. Chicago: The Open court publishing company, 1909.

SCHRÖDINGER, E. *What is life?* The physical aspect of the living cell. Nova York: The University Press, 1945.

SHASTRI, J. L. et al. *Ancient Indian tradition & mythology*: [Puranas in translation]. Delhi: Motilal Banarsidass, 1970.

SUTTON, W. S. The chromosomes in heredity. *Biological Bulletin*, v. 4, n. 5, p. 231-251, 1903.

SZOSTAK, J. W.; BARTEL, D. P.; LUISI, P. L. Synthesizing life. *Nature*, v. 409, n. 6818, p. 387-390, 2001.

TIRARD, S. Origin of life and definition of life, from Buffon to Oparin. *Origins of Life and Evolution of Biospheres*, v. 40, n. 2, p. 215-220, 2010.

TIRARD, S.; MORANGE, M.; LAZCANO, A. The definition of life: a brief history of an elusive scientific endeavor. *Astrobiology*, v. 10, n. 10, p. 1003-1009, 2010.

UNDERHILL, P. A. et al. The phylogeography of Y chromosome binary haplotypes and the origins of modern human populations. *Annals of Human Genetics*, n. 65, p. 43-62, 2001.

WATSON, J. D.; CRICK, F. H. C. Molecular structure of nucleic acids – a structure for deoxyribose nucleic acid. *Nature,* v. 171, n. 4356, p. 737-738, 1953.

A EVOLUÇÃO DA VIDA EM UM PLANETA EM CONSTANTE MUDANÇA

Capítulo 7

Daniel J. G. Lahr

A evolução é um fenômeno que ocorre em sistemas biológicos ao longo de grandes escalas de tempo. Desde seu surgimento, a vida está em contínua evolução. Os biólogos evolutivos definem evolução como um fenômeno de "descendência com modificação". Ou seja, as modificações que porventura surgem em um organismo (e existem diversas maneiras pelas quais essas modificações podem surgir) precisam ser herdadas pela prole desse organismo para terem algum efeito evolutivo. Essas modificações geralmente ocorrem ao nível do material genético (DNA, ou no caso de alguns vírus, RNA), e podem ter consequências drásticas nas características morfológicas, anatômicas ou fisiológicas. A prole e as gerações subsequentes de tais organismos definem uma população, que é a unidade de estudo utilizada pelos biólogos evolutivos. Essas modificações, que geralmente aparecem inicialmente em apenas um indivíduo, podem se espalhar e se tornar

presentes em toda população, porém, podem também ser completamente eliminadas da população. Quando uma característica consegue estar presente em todos os organismos de uma população, diz-se que ocorreu "fixação" (Quadro 7.1). Os motivos que levam, ou não, à fixação de uma característica também são diversos, e alguns deles serão explorados neste ensaio. Sistemas que se comportam dessa maneira são chamados de "sistemas biológicos".

O nosso planeta não é um sistema biológico, apesar de também sofrer mudanças, mas um sistema geológico, onde modificações são inseridas, na maioria das vezes, pela atividade tectônica de placas que causa a deriva dos continentes e vulcanismo. Essa atividade modifica profundamente a superfície terrestre e tem forte influência sobre a vida que ocupa a biosfera. Eventos episódicos como terremotos, tsunamis e colisões de corpos estelares têm um drástico efeito sobre as chances de sobrevivência das espécies, inclusive sobre os próprios eventos de especiação. Eventos mais prolongados como a deriva dos continentes, as flutuações de temperatura, e até mesmo as condições atmosféricas também têm um grande impacto sobre o sistema biológico, porém esse impacto ocorre em escalas de tempo muito maiores. Eventos episódicos e suas consequências geralmente recebem mais atenção, e por isso são mais conhecidos pela população. Um bom exemplo ilustrativo é a colisão do asteroide que causou a extinção de parte dos dinossauros ao final do Mesozoico. Esse impacto, apenas um entre outros milhares que já ocorreram no planeta, é amplamente conhecido pela população. Isso ocorre principalmente por causa do carisma que têm os dinossauros não avianos e da grande cobertura dada para eventos catastróficos pelos veículos midiáticos. Por isso, temos a impressão de que, na maior parte do tempo, a vida está muito mais sujeita à atividade do planeta do que o contrário. No entanto, existem diversos exemplos de que o resultado da evolução do sistema biológico modificou profundamente o sistema geológico do planeta que habitamos. Eventos que ocorrem lentamente, durante milhões de anos, são os principais eventos que moldaram a diversidade biológica.

Quadro 7.1. Descendência com modificação, deriva genética e vantagens adaptativas

Descendência com modificação é um dos conceitos centrais da teoria evolutiva proposta por Darwin, e atualmente utilizado por muitos cientistas como o critério fundamental para a definição de vida – apesar de existirem muitas controvérsias sobre qualquer definição sobre o assunto. O processo de modificação com descendência permite que adaptações sejam transmitidas para futuras gerações, garantindo, assim, que soluções encontradas para certos problemas não precisem ser inventadas novamente – como já diz a sabedoria popular, "ninguém quer reinventar a roda".

No entanto, a herança de características possui uma dinâmica própria. Existem dois tipos de características biológicas básicas: genéticas e fenotípicas. Os cientistas denominam fenotípicas todas as características do corpo de um organismo, como a forma dos dedos, a cor do cabelo, a altura e o peso. Adicionalmente, características fisiológicas, como a capacidade de realizar respiração aeróbica e produzir excretas nitrogenados na forma de ureia, também são consideradas caracteres fenotípicos – até mesmo a habilidade para resolver problemas matemáticos é um caráter fenotípico. As características fenotípicas são determinadas a partir da expressão da informação genética contida nos genes presentes no genoma de um organismo. Os organismos em geral possuem dois alelos para cada gene. Você pode pensar nos alelos como diferentes cores de um lápis, ou sabores de um mesmo sorvete. Os diferentes alelos têm, fundamentalmente, a mesma função, porém de maneira diferente. Uma característica importante da herança genética é que esses dois alelos não são herdados juntos: cada um deles pode ou não estar presente nas gerações descendentes. O processo que garante que os alelos homólogos não sejam herdados em conjunto nos organismos eucariontes é a meiose, realizada pela quase totalidade dos seres nucleados. Quando um dos alelos é perdido, e o outro alelo ocupa 100% das posições possíveis dentro da população, então diz-se que um dos alelos foi *fixado*.

Os processos que levam à fixação ou à perda de alelos são o principal local de ação da evolução e uma das mais intrigantes áreas de pesquisa biológica. Se um alelo produz um efeito excepcionalmente favorável ao organismo, especialmente aumentando o número de descendentes, esse alelo pode ser "selecionado positivamente". Diz-se, então, que o alelo confere ao organismo uma vantagem adaptativa. Quando um alelo sofre seleção positiva, rapidamente ocupa todas as posições possíveis dentro da população e elimina as outras variedades alélicas. Quando de sua proposição, Charles Darwin acreditava que esse era o principal método pelo qual a evolução determinava a diversidade fenotípica dos organismos. No entanto, a genética e a biologia molecular modernas demonstraram que a grande maioria dos genes está sujeita a um fenômeno muito mais aleatório: a deriva genética.

A deriva genética é apenas a variação aleatória nas frequências de alelos. Ela é repetidamente comparada com a "caminhada do bêbado". Imagine uma pessoa embriagada descendo uma ladeira bastante íngreme. Imagine que a única direção que essa pessoa pode ir é para baixo, pois não tem coordenação suficiente para subir a ladeira. A pessoa embriagada vai provavelmente ziguezaguear bastante até chegar ao fim da ladeira e acabará tropeçando na sarjeta, caindo sobre a calçada em um dos dois lados, onde presumivelmente vai dormir até que sua embriaguez passe. O tempo e o espaço percorrido até que esse indivíduo atinja um dos lados da rua depende de vários fatores iniciais: a largura da rua, quão próximo de um dos lados a pessoa começa e o comprimento da rua. Assim também funciona a deriva gênica: uma variedade alélica se comporta como a pessoa embriagada: sua frequência na população tende a ziguezaguear até o momento em que está presente em todos os organismos da população (fixada), ou desaparece completamente da população (extinta). O resultado, apesar de fundamentalmente aleatório, depende da frequência inicial do gene (equivalente a quão próximo de um dos lados da rua o bêbado está), o tamanho da população (equivalente à largura da rua) e do número de gerações que se passa (equivalente ao comprimento da rua). No entanto, se o alelo confere ao organismo uma

característica excepcionalmente boa, ou excepcionalmente ruim, o alelo é "empurrado" pela seleção natural e acaba fixado ou extinto muito mais rapidamente – como se alguém empurrasse o indivíduo embriagado para um dos lados da rua.

A deriva gênica é o processo que determina o destino da maioria das mutações não letais que surge nos genomas dos organismos. A maior parte das mutações não tem efeito benéfico ou maléfico – são simplesmente neutras. Sendo assim, elas apenas ziguezagueiam na população até serem eliminadas ou fixadas. Raramente surge uma mutação que realmente confere à população uma vantagem adaptativa, e determinar quais modificações são neutras ou adaptativas é um desafio que recebe bastante atenção dos pesquisadores.

Essa visão sobre a natureza e a dinâmica de mutações dentro de populações foi proposta inicialmente na década de 1960, por Emile Zuckerkandl, pesquisador austríaco que trabalhou com o ganhador do prêmio Nobel Linus Pauling, em um artigo considerado o fundador da área de evolução molecular (Zuckerkandl; Pauling, 1965). A hipótese foi corroborada pelos estudos matemáticos do pesquisador japonês Motoo Kimura (1968) alguns anos depois, iniciando um *boom* nos estudos evolutivos moleculares. A ideia encontrou resistência entre grande parte dos biólogos, que à época costumavam atribuir a grande variedade de formas encontradas na natureza ao poder "otimizador" da seleção natural. Para muitos cientistas, era inconcebível imaginar que a maior parte da diversidade da vida era atribuída simplesmente ao acaso. O golpe final ao pensamento puramente adaptacionista veio apenas no final da década de 1970 com a publicação do que viria a ser um dos mais influentes artigos na história da biologia, escrito pelos pesquisadores Stephen J. Gould e Richard Lewontin (1979).

Neste capítulo vamos explorar de maneira geral como a fotossíntese, um fenômeno derivado da evolução, foi responsável por determinar a composição atmosférica ao longo da história do planeta, e como a maior parte da diversidade biológica atual deve sua existência a essa mudança do sistema geológico causada pela atividade biológica.

Um panorama geral sobre a evolução da vida no planeta

A vida surgiu há pelo menos cerca de 3,5 bilhões de anos, durante o éon geológico conhecido como Arqueano. Os mais antigos fósseis amplamente reconhecidos como vestígios de algum organismo vivo são os estromatólitos, que foram formados pelo crescimento laminar de comunidades microbianas. Esses organismos cresciam formando uma camada sobre o substrato, chamada de biofilme, assim como muitas bactérias ainda o fazem.

O tártaro dental, por exemplo, é resultado da mineralização que ocorre sobre o biofilme de bactérias que está continuamente crescendo sobre os nossos dentes. No caso dos estromatólitos, o biofilme contém diversas substâncias secretadas pela comunidade microbiana, além dos próprios micróbios, e também acumula naturalmente finas partículas de sedimento, formando sobre si mesmo uma espécie de camada de "lama". Em cima dessa camada, outro biofilme eventualmente se desenvolve. A continuação desse processo ao longo de muitos anos é responsável pela formação típica dos estromatólitos em faixas alternadamente claras e escuras (Figura 7.1). Existem estromatólitos fósseis e estromatólitos modernos. Os mais famosos estromatólitos modernos são encontrados na Austrália, em Shark Bay, mas existem estromatólitos em muitos outros lugares do mundo, até mesmo no Brasil, na Lagoa Salgada, localizada no litoral norte do estado do Rio de Janeiro.

Os estromatólitos fósseis podem ocorrer em diversas formações geológicas ao redor do mundo. Os mais antigos vêm da formação de Turbiana, na Austrália. Acredita-se que os estromatólitos fósseis eram formados por organismos já extintos, distintos dos organismos que formam os estromatólitos modernos, que são formados por cianobactérias, ou seja, organismos procariontes, desprovidos de um núcleo celular. Acredita-se que os estromatólitos fósseis mais antigos eram formados por organismos apenas relacionados com as cianobactérias atuais, não necessariamente ancestrais diretos destas.



Figura 7.1. A figura mostra um estromatólito com data do período Proterozoico, que apresenta crescimento em domos. O esquema demonstra como as camadas claras e escuras se sobrepõem alternadamente. Fonte: Daderot/Creative Commons

A atmosfera há 3,5 bilhões de anos era bem diferente da atual. A maioria dos cientistas acredita que a atmosfera no Arqueano era neutra ou levemente redutora, e a quantidade de oxigênio era extremamente baixa (em torno de 0,01% do volume total da atmosfera). Ou seja, esses primeiros organismos surgiram sob condições bastante diferentes das atuais. Foi a atividade dos organismos fotossintéticos que mudou drasticamente as características químicas da atmosfera. A fotossíntese é uma atividade biológica que separa os átomos de hidrogênio e oxigênio presentes na molécula de água. Os átomos de hidrogênio são então combinados com gás carbônico para produzir hidrocarbonetos, e os átomos de oxigênio são combinados e liberados na forma biatômica (O_2). O principal objetivo da fotossíntese para esses organismos ancestrais era produzir hidrocarbonetos (especificamente, glicose) para seu próprio consumo. O oxigênio era apenas produzido como subproduto obrigatório dessa atividade essencial, e foi acumulando-se na atmosfera há cerca de 850 milhões de anos até atingir os níveis atuais de aproximadamente 20% do volume total da atmosfera. Note que esse valor não é totalmente estável: foram registradas variações de até 30%, as quais podem estar relacionadas a eventos ecológicos importantes.

A atividade fotossintética dos primeiros organismos procariontes foi responsável por mudanças drásticas no sistema geológico. A atmosfera, uma vez redutora, tornou-se oxidante, o que causou uma oxidação massiva dos minerais da crosta terrestre, produzindo grande parte dos minerais que hoje conhecemos. Biologicamente, antes dessa mudança, a principal estratégia metabólica adotada pelos organismos era provavelmente a respiração anaeróbia. A partir da elevação da quantidade de oxigênio disponível, outra estratégia metabólica ficou favorecida: a respiração aeróbia, que consome oxigênio e libera mais energia que os processos anaeróbios. Nesse caso, organismos que sofreram modificações genéticas que permitiram a respiração aeróbia se beneficiaram e deixaram maior número de descendentes.

Essas mudanças permitiram, portanto, que novos tipos de organismo surgissem. Depois do surgimento dos estromatólitos há 3,5 bilhões de anos, ocorreu um aumento gradual no nível de oxigênio que atingiu a concentração atmosférica de cerca de 2% há aproximadamente 2 bilhões de anos. Subsequentemente, com cerca de 1,8 bilhão de anos, foram encontrados os primeiros fósseis amplamente reconhecidos como vestígios de organismos eucariontes, principalmente a alga vermelha *Bangiomorpha*. Durante os anos subsequentes, surgiram muitas outras linhagens de algas, e ocorreu diversificação de diversos outros organismos eucariontes não fotossintetizantes. O aparecimento de muitas linhagens iniciais de algas eucarióticas, há cerca de 1 bilhão de anos, foi seguido por um rápido e expressivo aumento na concentração de oxigênio, que em apenas 200 milhões de anos atingiu cerca de 20%. Esse aumento na concentração de oxigênio permitiu ainda maior diversificação dos organismos eucariontes, culminando eventualmente no surgimento das formas multicelulares, como plantas e animais ao final do período Ediacarano, há cerca de 530-520 milhões de anos, em um momento conhecido como a Explosão do Cambriano (Valentine et al., 1999) (Figura 7.2).

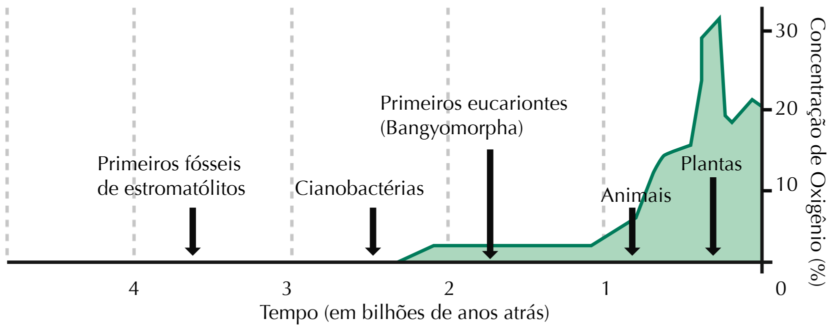


Figura 7.2. A concentração de oxigênio através das eras geológicas, com surgimento de vários grupos de organismos baseado na evidência fóssil e reconstruções moleculares. Fonte: IAG

A evolução da fotossíntese

A atual diversidade da vida está intrinsecamente ligada à composição da atmosfera. Nem a atmosfera, nem a biodiversidade atual existiriam sem o surgimento de um fenômeno fundamental: a fotossíntese. A fotossíntese em si é um fantástico exemplo de como a evolução atua. Não apareceu ao acaso, mas sim, da junção de diversas partes que surgiram independentemente para resolver problemas semelhantes enfrentados por organismos distintos (Douglas, 1998). A fotossíntese é uma extensa série de reações realizadas por enzimas especializadas e que ocorrem em partes especiais da célula.

O processo da fotossíntese se inicia no centro de reação fotossintético, onde a luz solar é capturada por pigmentos especializados, que podem ser pigmentos carotenoides ou a clorofila. Os centros de reação geralmente se encontram no centro de uma grande estrutura molecular chamada de complexo-antena. Esse complexo é responsável por canalizar a energia da luz para o centro de reação fotossintético. Essa energia é então utilizada em uma série de reações para quebrar a molécula da água e transformar gás carbônico em compostos orgânicos. O centro de reação fotossintético é um complexo de moléculas extremamente refinado: em organismos eucariontes, esse complexo pode ter até 13 subunidades e mais de 190 cofatores (proteínas associadas). Essa

complexidade e alta quantidade de proteínas envolvidas surgiu principalmente através de duplicações gênicas e substituições nucleotídicas subsequentes que levaram à neofuncionalização (Hohmann-Marriott; Blankenship, 2011) (Quadro 7.2).

A habilidade fotossintética surgiu, portanto, como resultado de processos evolutivos fundamentais, que ocorrem comumente em todas as linhagens de organismos: a duplicação gênica e subsequente neofuncionalização genética, deriva genética e seleção. Os primeiros organismos fotossintéticos, no entanto, provavelmente utilizavam hidrogênio ou sulfeto de hidrogênio como matéria-prima em vez de água. Os primeiros organismos a utilizar água para fotossíntese devem ter surgido há cerca de 3 bilhões de anos, e eram provavelmente muito semelhantes às cianobactérias modernas. Além das cianobactérias, existem ainda diversos tipos de algas fotossintetizantes: vermelhas, marrons e verdes. Uma linhagem de algas verdes se diversificou e adquiriu a capacidade de sobreviver em ambientes terrestres, dando origem a todas as plantas. No entanto, será que essas linhagens de algas, que são organismos eucarióticos, tiveram que reinventar toda a complicada série de reações metabólicas que provavelmente levou milhões de anos para surgir? É aqui que mais um evento evolutivo entra em ação: a endossimbiose.

Trata-se de uma relação em que dois organismos se associam de maneira muito íntima, de forma que um não consegue mais viver sem o outro. As endossimbioses ancestrais foram essenciais para o desenvolvimento da vida como a conhecemos atualmente. O próprio surgimento dos organismos eucarióticos provavelmente não seria possível sem a endossimbiose. Existem três grandes tipos de organismos celulares no planeta: os eucariontes, as bactérias e as arqueias. O entendimento sobre essa divisão fundamental da vida só ocorreu ao final da década de 1970, principalmente por causa do trabalho de reconstrução histórica a partir de dados de sequências genéticas feito pelo pesquisador Carl Woese (2000).

Os três grandes grupos são chamados de domínios e representam a mais fundamental divisão dos organismos vivos. Os

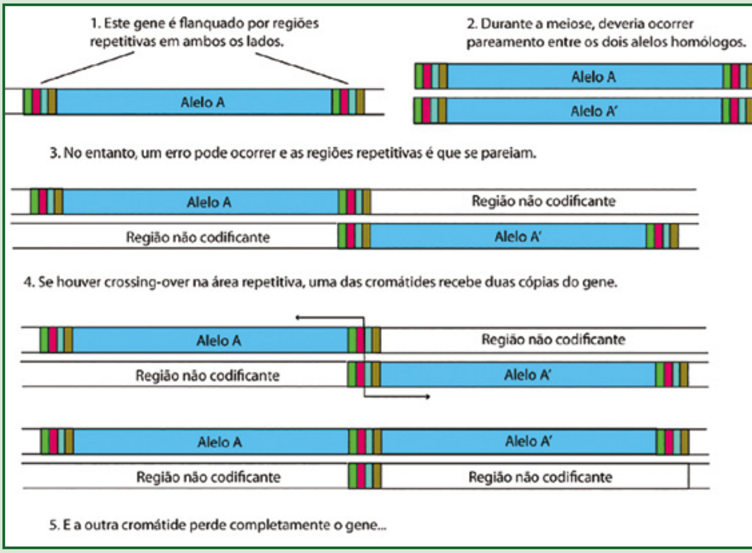
Quadro 7.2. Duplicação gênica

Esse fenômeno genômico foi inicialmente proposto por Susumu Ohno na década de 1970 como uma das principais forças evolutivas. Cientistas, desde então, têm estudado profundamente os padrões e mecanismos relacionados a esse fenômeno. Mecanicamente, o processo de duplicação gênica pode acontecer de várias maneiras, todas relativamente simples e de comum ocorrência nos diversos organismos.

Acredita-se que o meio mais comum de um gene ser duplicado é por um erro no momento da recombinação homóloga, que ocorre durante a meiose. Para que isso aconteça, as sequências nucleotídicas que se localizam fora do gene, acima e abaixo da região onde está localizado, devem ser iguais. Isso acontece frequentemente, pois existem muitas regiões não codificantes no genoma, que tendem a ser formadas pela repetição de uma série pequena de nucleotídeos. Estando a região genômica assim organizada, o pareamento (que sempre ocorre durante a meiose) pode ocorrer entre sítios incorretos, resultando em uma cromátide com duas cópias e a outra sem nenhuma. Se o gene for essencial, a cromátide desprovida de cópia não formará um gameta viável, enquanto a outra pode se reproduzir e deixar descendentes que possuem duas cópias daquele gene em particular. Existem outras maneiras pelas quais a duplicação gênica pode ocorrer: mediada por retrotransposição ou até mesmo como parte de uma duplicação de uma região maior do cromossomo.

As duas cópias geradas no evento de duplicação estão sujeitas a ações independentes dos processos evolutivos. Essas cópias, chamadas de parálogos, terão, portanto, destinos diferentes. Em geral, uma das cópias fica livre de pressões seletivas, pois a outra está exercendo a função essencial. Na maior parte das vezes, a cópia que não sofre pressão seletiva acaba sofrendo mutações aleatórias que a destituem completamente de qualquer função. Esse processo, chamado de "pseudogenização", acaba por degenerar a sequência do gene por completo, a tal ponto que não conseguimos mais reconhecer que

aquela região em particular foi um gene. O gene duplicado é então perdido.



No entanto, outra opção é que as mutações confiram ao gene novas habilidades, em um processo chamado de *neofuncionalização*. Ohno defendia a tese de que esse é o principal processo de inovação genética utilizado pelos organismos, e as pesquisas realizadas até hoje corroboram sua visão. Um exemplo bastante comum são as hemoglobinas humanas. Elas são formadas por quatro subunidades, de dois tipos *a* e *b*. Cada hemoglobina possui duas subunidades *a* e duas subunidades *b*. Os genes que codificam cada tipo de subunidade são produtos de duplicação gênica, ou seja, um gene ancestral de hemoglobina se duplicou e deu origem ao gene que codifica a subunidade *a* e outro que codifica a subunidade *b*.

eucariontes provavelmente surgiram da união entre arqueias e bactérias. Especula-se que uma arqueia engoliu uma bactéria do grupo das alfa proteobactérias, e a primeira passou a ser responsável pela geração de energia na forma de ATP para a arqueia hospedeira, e lentamente tornou-se a mitocôndria. Essa união

de dois organismos fundamentalmente diferentes deu origem aos eucariontes.

O processo de endossimbiose também é gradual e possui uma série de características típicas. Geralmente, o organismo endossimbiótico se especializa em uma única função, sofrendo drástica redução genômica. As mitocôndrias, por exemplo, possuem um pequeno genoma que varia de 15 a 20 mil pares de bases, e abriga geralmente de 20 a 30 genes, apenas o necessário para exercer sua específica função energética. Seus outros milhares de genes foram perdidos, pois realizavam funções redundantes com as funções que o hospedeiro já realizava, ou podem até mesmo ter sido transferidos para o genoma do hospedeiro. Os genomas mitocondriais geralmente não possuem regiões não codificantes e são altamente eficientes.

A aquisição das mitocôndrias não foi o único evento endossimbiótico na história dos eucariontes. Mais tarde, uma linhagem de organismos eucariontes engoliu uma cianobactéria, dando origem assim ao cloroplasto, a organela onde ocorre a fotossíntese. Essa relação íntima já tinha sido proposta pelo botânico russo Mereschkowsky no início do século passado, mas foi amplamente desenvolvida e estudada pela cientista americana Lynn Margulis nas décadas de 1960 e 1970 – curiosamente, à época da publicação de seu primeiro artigo científico sugerindo a endossimbiose como evento evolutivo fundamental, Margulis era casada com o astrônomo e divulgador científico Carl Sagan, e o artigo foi publicado sob o nome Lynn Sagan, o que talvez explique o motivo de tal artigo ser pouco conhecido atualmente (Sagan, 1967).

As primeiras evidências que determinavam essa relação foram morfológicas: a organização em lamelas presente nas cianobactérias é semelhante à organização de membranas internas no cloroplasto. Além disso, a maioria dos cloroplastos possui duas membranas, assim como as mitocôndrias. Isso porque, durante a endossimbiose, o primeiro passo é a fagocitose da cianobactéria, momento em que o organismo hospedeiro

envolve o endossimbionte em uma membrana. A outra membrana corresponde à própria membrana celular do endossimbionte. Alguns cloroplastos ainda, como os de diatomáceas e dinoflagelados, possuem mais de duas membranas. Isso é evidência de que além da endossimbiose ancestral que deu origem ao cloroplasto, em alguns organismos ocorreram ainda outras, chamadas de endossimbioses secundárias e terciárias.

A endossimbiose é, portanto, um evento comum na história evolutiva. Um exemplo interessante é o da ameba *Paulinella chromatophora*. Essa ameba de água doce possui duas grandes organelas verdes, chamados cromatóforos, que são derivados da endossimbiose de uma cianobactéria, que ocorreu há apenas 60 milhões de anos, mais ou menos na mesma época em que parte dos dinossauros foram extintos (alguns dinossauros ainda estão vivos: a linhagem das aves) – ou seja, é um tempo muito curto na escala evolutiva. Essas amebas fagocitaram uma cianobactéria da linhagem das *Prochlorococcus* e o processo de redução genômica ainda está ocorrendo. A todo momento, cientistas descobrem mais um gene do cromatóforo que foi transferido para o genoma nuclear de *P. chromatophora*. Muitas outras amebas permitem que bactérias vivam livremente em seus citoplasmas, portanto, é possível que sejam descobertos ainda mais endossimbiontes recentes (Figura 7.3).

Apesar de um evento comum, é bastante provável que a maioria dos organismos eucariontes fotossintetizantes tenha se originado de uma única endossimbiose ancestral. Isso pode ter acontecido tanto por esses organismos terem desenvolvido uma adaptabilidade maior ao seu ambiente relacionada à capacidade de fotossintetizar, mas também pode ter sido um processo simplesmente aleatório, ligado à deriva. Essa endossimbiose ancestral deu origem a todas as algas e plantas. Com isso, a atividade fotossintética aumentou drasticamente, permitindo o surgimento de mais e mais organismos heterotróficos, ou seja, os que se alimentam por predação.

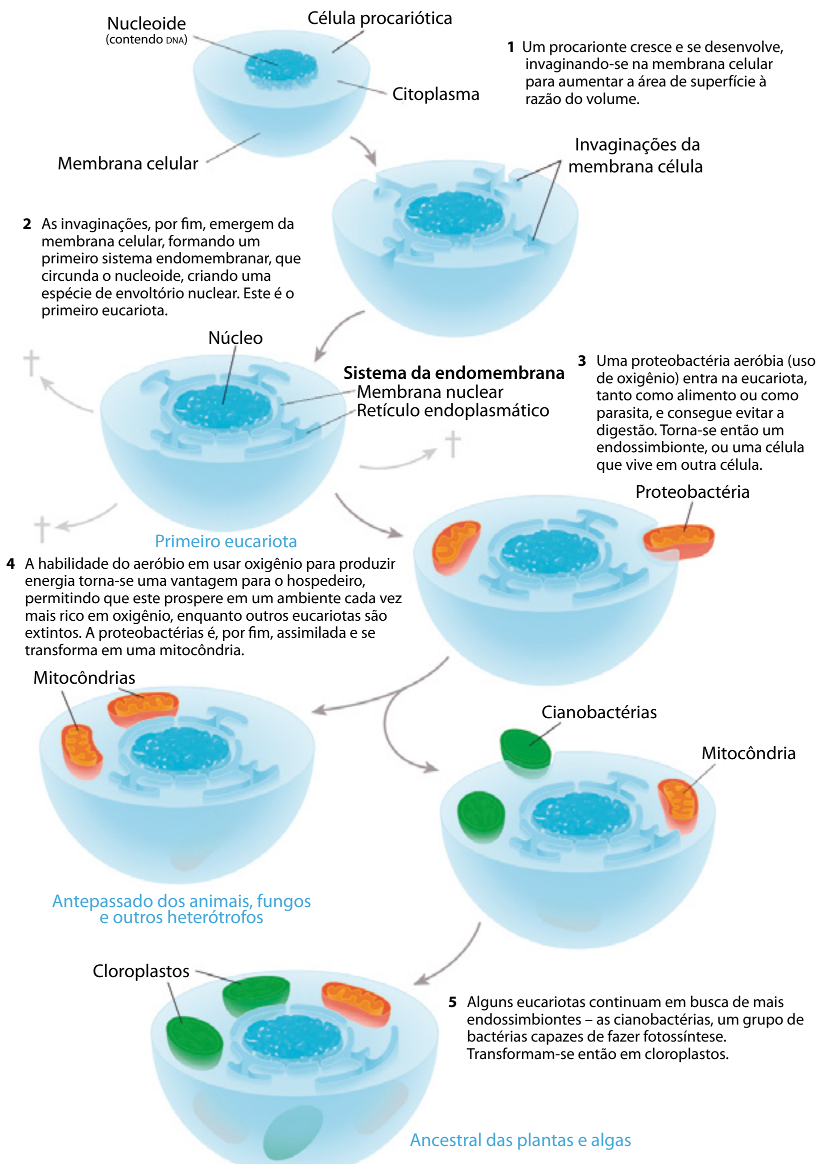


Figura 7.3. Detalhes do processo de endossimbiose. Fonte: Kelvin Song/ Creative Commons

Logo, a grande diversificação das algas levou, subsequentemente, à grande diversificação de outros protistas. Os cientistas estimam que existam atualmente cerca de 70 a 90 grandes linhagens de eucariontes, três delas sendo as plantas, fungos e animais. Alguns exemplos das outras linhagens são as amebas, euglenas, paramécios, dinoflagelados e muitos outros. Toda essa diversidade aparentemente surgiu durante o aumento gradual de oxigênio na atmosfera, ou depois de se atingir o nível de 20% oxigênio em volume. Derivados desses organismos, somente há cerca de 500 milhões de anos surgiram as conhecidas linhagens de animais, e mais tarde ainda, as plantas (Knoll, 2014).

O processo evolutivo, que ocorre desde o surgimento da vida na Terra, foi, portanto, o responsável pela composição atual da atmosfera terrestre, um grande exemplo de como o sistema biológico pode afetar profundamente o sistema geológico. Todas essas modificações ocorreram lentamente durante centenas de milhões de anos. O sistema geológico, por sua vez, restringe quais tipos metabólicos podem existir, determinando, assim, a adaptabilidade das diversas linhagens de organismos. O sistema geológico ainda tem grande impacto sobre eventos de diversificação, como especiações que ocorrem com o surgimento de barreiras geológicas. Assim, o desenvolvimento dos dois sistemas ao longo do tempo é intrinsecamente ligado: inovações que ocorrem em sistemas tendem a ter profundos impactos entre si.

Referências

Douglas, S. E. Plastid evolution: origins, diversity, trends. *Current Opinion in Genetics & Development*, v. 8, p. 655-661, 1998.

Gould, S. J.; Lewontin, R. C. The spandrels of San Marco and the panglossian paradigm: a critique of the adaptationist programme. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, v. 205, p. 581-598, 1979.

Hohmann-Marriott, M. F.; Blankenship, R. E. Evolution of photosynthesis. *Annual Review of Plant Biology*, v. 62, p. 515-548, 2011.

KIMURA, M. Evolutionary rate at the molecular level. *Nature*, v. 217, p. 624-626, 1968.

KNOLL, A. H. Paleobiological perspectives on early eukaryotic evolution. *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology*, v. 6, 2014.

OHNO, S. *Evolution by gene duplication*. London: George Alien & Unwin Ltd. Berlin, Heidelberg and New York: Springer-Verlag. Disponível em: http://www.cabdirect.org/abstracts/19720103934.html. Acesso em 17 nov. 2015.

SAGAN, L. 1967. On the origin of mitosing cells. J. *Theor. Biol*. v. 14, 225-IN6.

VALENTINE, J. W.; JABLONSKI, D.; ERWIN, D. H. Fossils, molecules and embryos: new perspectives on the Cambrian explosion. *Development,* v. 126, p. 851-859, 1999.

WOESE, C. R. Interpreting the universal phylogenetic tree. *Proc. Natl. Acad. Sci*, v. 97, p. 8392-8396, 2000.

ZUCKERKANDL, E.; PAULING, L. Evolutionary divergence and convergence in proteins. *Evol. Genes Proteins*, v. 97, p. 97-166, 1965.

VIDA AO EXTREMO

A magnífica versatilidade da vida microbiana em ambientes extremos da Terra

Capítulo 8

Rubens T. D. Duarte, Catherine G. Ribeiro e Vivian H. Pellizari

Introdução

Os 3,8 bilhões de anos nos quais a vida se desenvolveu em nosso planeta forjaram um amplo espectro funcional da vida microbiana, permitindo-a ocupar nichos considerados inabitáveis para a vasta maioria de outros seres vivos. A afinidade pelo extremo faz de alguns micro-organismos terrestres importantes alvos no estudo da astrobiologia, pois refletem a plasticidade da vida nos mais diversificados e inóspitos ambientes.

Micro-organismos, os colonizadores do planeta

O escopo da astrobiologia figura-se mais vasto do que a procura por seres inteligentes e capazes de desenvolver ferramentas avançadas. A busca por vida extraterrestre baseia-se principalmente na prospecção de formas mais simples, que dominaram a história da evolução da vida na Terra: os micro-organismos. A diversidade metabólica e a capacidade de propagação conferiram aos

seres microscópicos unicelulares uma longa existência em nosso planeta. A origem da vida na Terra teve início pouco tempo depois de sua formação, quando o planeta ainda era um corpo recém-solidificado. Porém, quais são os fatores que permitem a existência de vida ou a habitabilidade de um planeta? A resposta para essa pergunta ainda não é conhecida, no entanto, é o alvo prioritário da astrobiologia. Através do estudo dos ambientes extremos da Terra podemos vislumbrar as fronteiras para a ocorrência e propagação da vida em ambientes extraterrestres e sondar a incrível complexidade e o poder de sua adaptação.

Extremófilos

Em 1964, o microbiologista norte-americano Thomas Brock fez uma descoberta que mudou o conceito de vida: ele observou micro-organismos sobrevivendo ao redor de gêiseres do Parque Nacional do Yellowstone (EUA) que lançavam água a 82 °C, uma temperatura muito acima da tolerância dos seres vivos. Mais tarde, em 1967, Brock publicou os resultados de sua pesquisa descrevendo que o micro-organismo, identificado como uma arqueia e batizada de *Thermus aquaticus*, não apenas tolerava altas temperaturas, mas também *exigia* essa temperatura para crescer. Passamos, então, a conhecer um novo grupo de seres vivos – os extremófilos. Muitos pesquisadores começaram a explorar diferentes ambientes à procura de vida, muitos dos quais considerados até então inóspitos por serem ambientes extremos.

O conceito ecológico de ambiente extremo está intrinsecamente atrelado ao conceito humano de habitabilidade. Uma ampla gama de ambientes com extremos de calor, frio, pH, salinidade, pressão e radiação são dominados por micro-organismos, cuja divergência genética manifestada em diferenciação metabólica possibilitou a ocupação de nichos considerados improváveis. Esses ambientes podem ser característicos de exoplanetas com potenciais chances de abrigar vida, mesmo que suas condições ambientais sejam diferentes das condições medianas do planeta Terra. Atualmente, podem ser encontrados em cultura representantes de

todas as classes de extremófilos, entre elas, organismos termofílicos, hipertermofílicos, psicrofílicos, acidofílicos, alcalifílicos, barofílicos e halofílicos.

Uma canção de gelo e fogo

As estratégias microbianas para suportar ambientes extremamente quentes ou frios estão entre os principais assuntos estudados pela astrobiologia. Existem na Terra inúmeros ambientes quentes que normalmente estão associados a atividades vulcânicas. Fontes termais, gêiseres, e mesmo o interior de vulcões já foram explorados e uma ampla diversidade de micro-organismos foi encontrada sobrevivendo em altas temperaturas, denominada termofílica. Muitas bactérias, arqueias e fungos adaptados ao calor extremo conseguem sobreviver nesses ambientes a partir de uma série de adaptações de suas proteínas e estrutura celular, moldadas durante milhões de anos pela evolução. Estudos indicam que o provável ancestral de todos os seres vivos tenha sido uma célula adaptada ao calor extremo, uma vez que 3,8 bilhões de anos atrás a Terra tinha um cenário quase inóspito – muito calor, vulcanismo e diferente composição atmosférica. Uma das mais fortes evidências para a origem da vida em altas temperaturas é a ocorrência de micro-organismos adaptados ao calor nos ramos mais profundos da atual árvore filogenética: muito provavelmente todos os seres vivos compartilham uma origem no calor.

A descoberta recente de uma ampla gama de organismos habitando a crosta oceânica surpreendeu ao revelar vida em abundância onde previamente não se acreditava haver grande diversidade. Pesquisadores encontraram atividade biológica em rochas denominadas gabroicas (1.391 metros de profundidade) da crosta oceânica do Atlântico, responsáveis pela maior porção do leito oceânico, nas quais podem ser observadas temperaturas próximas ao ponto de fervura da água (Mason et al., 2010). Genes relativos a processos metabólicos como fixação de nitrogênio e carbono foram observados. Nesse estudo, a relação entre micro-organismos habitando ecossistemas de alta temperatura e pressão no interior

de rochas e o ciclo do metano ganhou destaque por causa da correlação com a prospecção de vida em Marte. O planeta vermelho tem metano concentrado em algumas regiões equatoriais da atmosfera, sendo considerado de fonte geológica, podendo comportar micro-organismos consumidores desse elemento.

As condições extraterrestres caracterizadas pelo frio extremo (calotas polares marcianas ou corpos cobertos por gelo, como Europa, no sistema jupiteriano) também podem ser investigadas a partir de ecossistemas da Terra (Figura 8.1). Para tanto, cientistas analisam ambientes como neve e gelo glaciares da Antártica como análogos desses possíveis nichos extraterrestres. Uma grande variedade de micro-organismos já foi encontrada nesses ambientes, muitos dos quais são capazes de tolerar temperaturas próximas ao grau de congelamento, assim como baixos níveis de oxigênio, e de crescer na total ausência de substrato orgânico. Esses micro-organismos adaptados ao frio, também chamados de psicrofílicos, são alvos de muitas pesquisas em astrobiologia. Pesquisadores do Oregon (EUA) conseguiram reproduzir em laboratório um ambiente análogo à gelada subsuperfície marciana, onde micro-organismos foram capazes de sobreviver usando apenas a oxidação do ferro presente na rocha ígnea olivina (Popa et al., 2012). Tal comparação tem suporte no fato de que dados científicos provenientes de satélites e análises diretas identificaram o mesmo mineral em rochas de Marte.

Bactérias foram descobertas sobrevivendo em um dos ambientes mais inóspitos do planeta: cerca de 3.000 m de profundidade no interior do manto de gelo da Groenlândia e da Antártica (Miteva; Brenchley, 2005; Christner et al., 2006). As condições extremas dentro do gelo incluem temperaturas muito abaixo de 0 °C, ausência de luz, baixa ou nenhuma concentração de oxigênio, altas pressões, e baixa disponibilidade de água líquida – uma vez que quase toda a água ali está na forma sólida. A origem e as estratégias de sobrevivência desses micro-organismos no gelo ainda intrigam os cientistas.

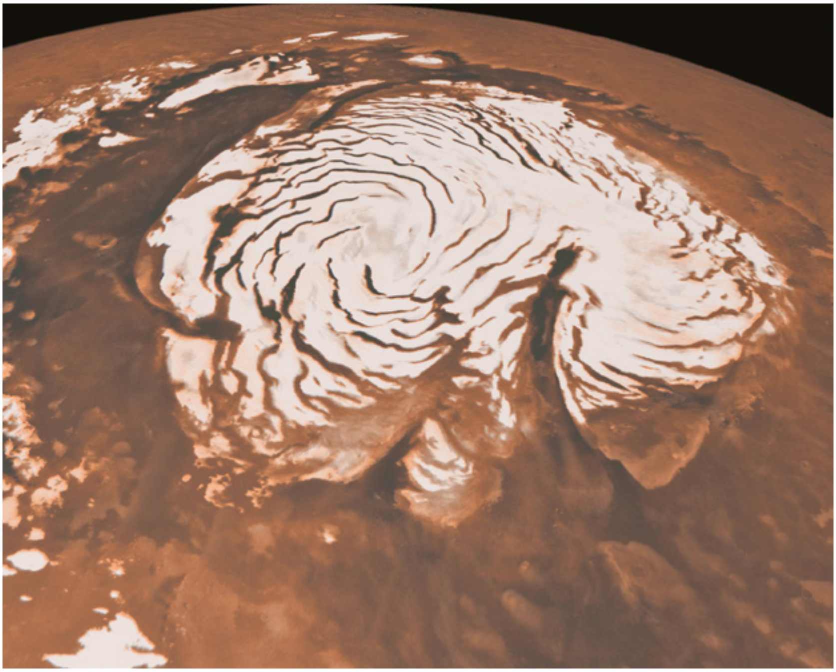


Figura 8.1. Calota de gelo do planeta Marte (Nasa). Fonte: Nasa/JPL-Caltech/MSSS

Ambientes de frio extremo ainda possuem outra característica de grande importância para a astrobiologia: temperaturas abaixo de zero são capazes de preservar o material biológico como proteínas, carboidratos, lipídeos, pigmentos, DNA e até mesmo células vivas ou em estado de dormência. Essas condições são típicas de ambientes polares, principalmente no interior de geleiras ou em solos chamados *permafrost*, um tipo específico de sedimento que fica milhares ou até milhões de anos com a temperatura constantemente abaixo de zero. Pesquisadores já relataram uma grande diversidade de micro-organismos dentro do *permafrost*. Algumas dessas células foram capazes de crescer em culturas de laboratório, sendo as mais antigas encontradas em depósitos congelados há 3 milhões de anos na Sibéria e há 5 milhões de anos na Antártica (Rodrigues et al., 2006; Gilichinsky et al., 2008).

As biomoléculas, em teoria, podem ser preservadas por um período ainda maior. Em um estudo conduzido por pesquisadores

brasileiros da Universidade de São Paulo (USP) em colaboração com cientistas da Academia de Ciências da Rússia, amostras de *permafrost* da Sibéria e da Antártica foram avaliadas quanto à taxa de preservação do DNA (Duarte, 2010). Nesse estudo, os pesquisadores conseguiram detectar moléculas de DNA preservadas em amostras congeladas de até 8,1 milhões de anos atrás. Esses limites de longevidade são importantes ao considerar que outros corpos do Sistema Solar têm solos como o *permafrost*, expandindo as possibilidades de se encontrar vida em ambientes muito abaixo de zero grau.

Barofílicos – a vida nas profundezas dos oceanos

A biosfera de profundidade é representada por organismos que prosperam em altas pressões (também conhecidos por barofílicos), além da ausência de luz, falta de oxigênio e pouco suprimento de nutrientes. Embora esse ecossistema tenha sido estudado apenas recentemente, algumas descobertas atestam sua importância para os ciclos globais do carbono. Estima-se que os micro-organismos presentes nesses locais contabilizem 90 bilhões de toneladas de carbono, cerca de 1/10 do carbono estocado por todas as florestas tropicais do planeta.

No início, mesmo incapazes de distinguir células vivas de células mortas, os cientistas observaram que o sedimento marinho abrigava uma imensa quantidade de micro-organismos e um cálculo estimava que mais da metade da microbiota terrestre habita o fundo do mar (Kallmeyer et al., 2012). Bactérias, arqueias e fungos dos mais variados grupos taxonômicos foram identificados, sendo grande parte adaptada a sobreviver em temperaturas frias (em média, a temperatura da água marinha nessa profundidade é de cerca de 2 ºC) e a pressões 300 vezes acima da pressão atmosférica no nível do mar. Realizar metabolismo nessas condições é uma tarefa árdua, principalmente por causa da pouca disponibilidade de nutrientes (carbono, nitrogênio e fósforo).

Entretanto, dados recentes indicam que grande parte do carbono no fundo do oceano circula por causa dos vírus. Um grupo de oceanógrafos da Universidade Politécnica de Marche, na Itália, estudou 232 amostras de sedimento marinho e concluiu que os vírus têm papel-chave na circulação de carbono do oceano, liberando até 630 milhões de toneladas de carbono que são sequestradas por micro-organismos à medida que afundam até as profundezas do mar (Danovaro et al., 2008). Os vírus promovem uma espécie de mecanismo autossustentável, que é responsável tanto pela morte quanto pelo crescimento dos outros micro-organismos marinhos.

Mesmo depois dessas descobertas, o debate sobre a habitabilidade das profundezas ainda não foi totalmente solucionado. Um estudo conduzido por pesquisadores no âmbito do programa internacional de pesquisa marinha IODP (Integrated Ocean Drilling Project) começou a montar esse complexo quebra-cabeça. Eles estudaram amostras de sedimentos marinhos coletadas até 400 m no fundo do oceano, que datavam de 16 milhões de anos atrás (Schippers et al., 2005). Os cientistas utilizaram métodos de biologia molecular baseados na detecção de moléculas de RNA de bactérias. Essa molécula participa da síntese de proteínas nas células e, como é rapidamente degradada no ambiente, sua presença pode indicar células metabolicamente ativas. A equipe de pesquisadores detectou uma grande quantidade de moléculas de RNA nesses sedimentos, e os resultados indicam que entre 10 e 30% dos micro-organismos das profundezas estão vivos.

Vida em baixas umidades e altas salinidades

Os solos dos locais mais áridos da Terra, como os Dry Valleys na Antártica e o deserto do Atacama, no Chile, são palco de estudos sobre uma das questões primordiais da astrobiologia: a necessidade de água para o desenvolvimento da vida (Figura 8.2). Um dos pontos de maior interesse é a análise da atividade metabólica da biota presente nesses locais, ou seja,

como os organismos presentes estão ativamente interagindo com seu ambiente e prosperando nas baixas umidades dessas regiões. Uma das chances para o desenvolvimento de atividade microbiana seria o lapso de tempo quando a interface entre solo árido e lama congelada derretem durante o verão, por exemplo, nos Dry Valleys. Nessa época, finas camadas de água líquida podem se formar entre os grãos de areia. Tal efeito não poderia ser observado nas atuais características ambientais de Marte. Porém, o passado pode ter tido uma história diferente. Atualmente, o eixo de rotação marciano encontra-se bastante próximo ao da Terra. Entretanto, há 5 milhões de anos, seu eixo apresentava-se inclinado 45°, de modo que as regiões polares recebiam luz solar constante durante boa parte do ano, sendo possível uma pequena janela para a existência de água na forma líquida, como acontece nos ambientes áridos do nosso planeta.

O deserto do Atacama também apresenta outra característica propícia a certos organismos extremófilos: ambientes hipersalinos. Organismos halofílicos enfrentam desafios principalmente relacionados à desidratação e ao estresse osmótico. Com o intuito de contrabalancear a força osmótica promovida por um ambiente hipersalino, a maior parte desses organismos desenvolve estratégias de síntese de protetores osmóticos. Estes são compostos solúveis orgânicos que contribuem para o potencial de solubilidade, mas não rompem biomoléculas como fazem os sais inorgânicos. Cientistas observaram, no solo chileno, uma relativa alta diversidade microbiana proliferando na ausência de luz do sol ou oxigênio, a cerca de dois metros de profundidade (Parro et al., 2011). Esses locais são formados por compostos higroscópicos, ou seja, com tendência a absorver a umidade do ar, condensando a pouca umidade na superfície dos cristais de sal. Essa descoberta foi realizada utilizando-se a ferramenta Solid (Detector de Sinais de Vida, em português), um instrumento dotado de *biochip* para a análise de presença de açúcares, DNA e proteínas, projetado para futuras missões a Marte.

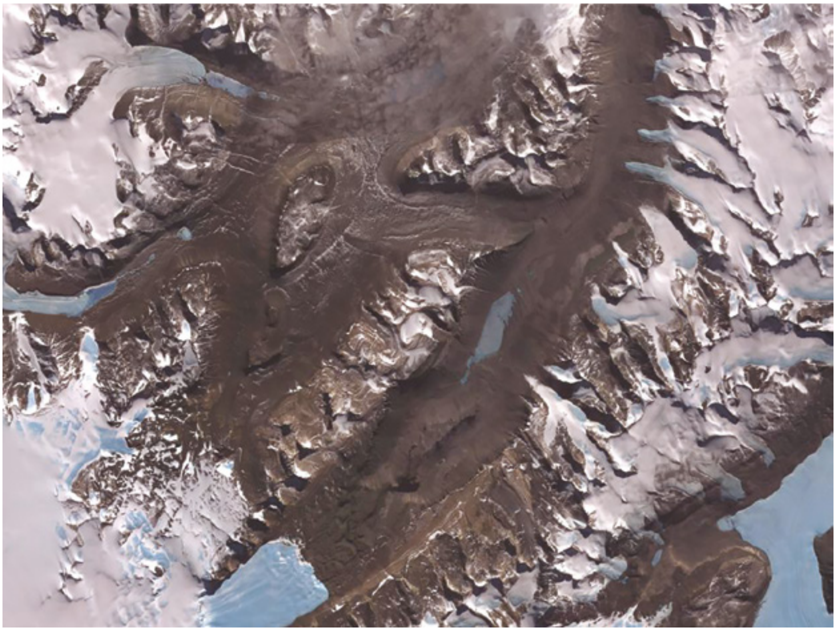


Figura 8.2. Dry Valleys, na Antártica, um dos desertos mais secos da Terra. Fonte: Nasa/GSFC/METI/ERSDAC/JAROS E U.S./Japan ASTER Science Team

Resistência à radiação

Embora a maioria das espécies existentes na atualidade necessite de um escudo para a radiação solar de alta energia, alguns micro-organismos são capazes de suportar e proliferar em altos níveis de radiações ultravioleta e ionizante. A bactéria de solo *Bacillus subtilis* detém o recorde de seis anos de sobrevivência no espaço (Horneck; Bücker; Reitz, 1994; Wassmann et al., 2012). Outra bactéria, denominada *Deinococcus radiodurans*, é considerada um dos seres vivos mais resistentes à radiação ionizante. Essa bactéria de pigmento laranja-avermelhado foi descoberta por acaso em 1956, quando a indústria começou a usar radiação gama para esterilizar comida enlatada. Doses mil vezes maiores que a dose capaz de matar seres humanos não causam efeito letal nessa bactéria.

A pesquisa envolvendo resistência em níveis consideráveis de radiação também está correlacionada às questões sobre panspermia e à possibilidade de micro-organismos sobreviverem a longas viagens

de asteroides, servindo como colonizadores em diferentes sistemas planetários. Testar essa hipótese é extremamente complicado, pois, inicialmente, precisaríamos encontrar vida em algum planeta e posteriormente compará-la com a terrestre. No entanto, um estudo conduzido por brasileiros da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) em conjunto com pesquisadores argentinos da Universidade de Buenos Aires (UBA), revelou dados surpreendentes (Abrevaya et al., 2011). A equipe de cientistas testou a possibilidade de sobrevivência de micro-organismos extremófilos a uma viagem interplanetária simulada em laboratório, principalmente quanto à resistência das células em ultravácuo e ao espectro completo de radiação ultravioleta. Entre os micro-organismos testados havia, evidentemente, a bactéria recordista de sobrevivência *D. radiodurans* (Figura 8.3), além de duas espécies de arqueias halofílicas *Natrialba magadii* e *Haloferax volcanii*. Essas haloarqueias, como também são conhecidas, são organismos modelos para habitabilidade em astrobiologia, não apenas

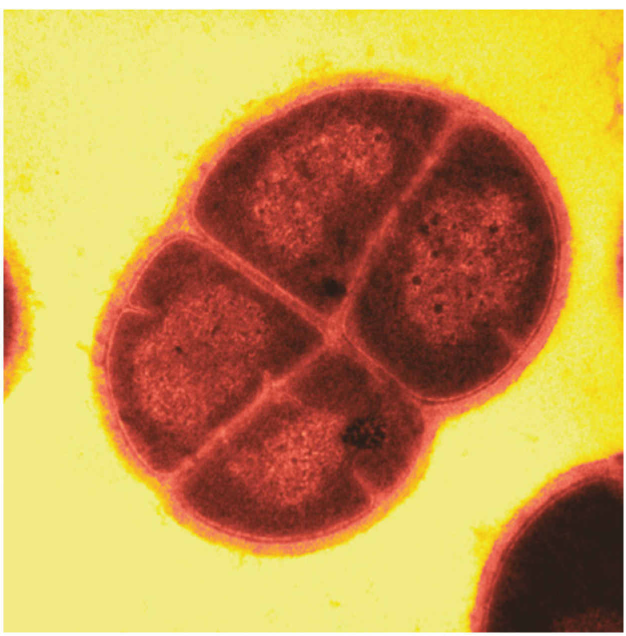


Figura 8.3. Fotografia em microscopia eletrônica da bactéria radiotolerante *Deinococcus radiodurans*. Fonte: Latin stock

por serem capazes de sobreviver em ambientes com alta salinidade (o solo de Marte, por exemplo), mas também por sua habilidade de crescer em extremos de temperatura, pH e radiação. O experimento mostrou que, enquanto as células de *H. volcanii* foram totalmente destruídas, cerca de 0,1 a 1% das populações de *N. magadii* e *D. radiodurans* resistiram ao estresse causado por alto-vácuo (10^{-5} Pa) e altas doses (1350 $J.m^{-2}$) de radiação UV de alta energia, quase na faixa do raio X.

Porém, não só bactérias podem sobreviver ao inóspito ambiente espacial: liquens também têm essa característica. Em um experimento realizado no laboratório orbital Columbus, da Estação Espacial Internacional (ISS, na sigla em inglês), a espécie de líquen *Xanthoria elegans* foi capaz de suportar radiação cósmica, UV, o vácuo e temperaturas variáveis (Sancho et al., 2007; Onofri et al., 2012). Nesse experimento, um total de 664 amostras biológicas e bioquímicas foi exposto às condições espaciais por cerca de 18 meses.

Acidofílicos e alcalifílicos

Micro-organismos vivos também proliferam em pH extremos e muitas vezes requerem ambientes extremamente ácidos ou alcalinos para apresentarem atividade metabólica. O pH tem uma gradação logarítmica de 0 a 14 e mede a concentração de íons H^+ em solução. A maior parte dos processos biológicos no planeta Terra tende a acontecer na porção mediana da escala. Os micro-organismos acidofílicos (adaptados ao ácido, ou pH abaixo de 5,0) e os alcalifílicos (adaptados à alcalinidade, com pH acima de 9,0) não têm muito em comum, a não ser o fato de serem extremófilos. São organismos de grupos diferentes, que evoluíram com adaptações distintas. Entre os amantes do ácido, a arqueia *Picrophilus* é considerada a espécie mais acidofílica já encontrada, isolada de solos vulcânicos do Japão, tendo um crescimento ótimo em pH 0,7 – algo entre um ácido de bateria veicular e o ácido sulfúrico (Schleper et al., 1995). Embora solos ácidos sejam abundantes em nosso planeta, ambientes alcalinos são particularmente difíceis de serem encontrados e são representados principalmente por áreas

geotermais, solos ricos em carbonato e alguns lagos alcalinos. A bactéria *Bacillus alcalophilus*, por exemplo, sobrevive em lagos alcalinos de pH acima de 10 (Ntougias et al., 2006). Organismos que vivem em extremos de pH são importantes modelos para estudos de metabolismo microbiano, pois as estratégias para obter energia são particularmente dependentes da diferença do pH dentro e fora da célula. Dessa forma, acidofílicos e alcalifílicos podem dar pistas importantes para a astrobiologia, indicando possíveis alternativas para o metabolismo energético em ambientes extremos fora da Terra.

A caixa-preta biológica

A prospecção pela existência de vida fora da Terra pode encontrar barreiras dentro da pesquisa biológica convencional. Uma das questões que desafiam a microbiologia ambiental é a chamada Caixa-Preta Biológica (ou Biosfera Oculta), que representa o desconhecimento da maior porção da microbiota que nos cerca. Esse fenômeno decorre das limitações de cultivo de micro-organismos *in vitro*: a ciência ainda não é capaz de simular todas as condições necessárias para o crescimento de muitas espécies de micro-organismo. Estima-se que menos de 1% da biodiversidade microbiana já tenha sido cultivada em laboratório. Isso é ainda mais crítico ao se tratar de extremófilos, pois pouco conhecemos sobre sua biologia. Em termos práticos, essa impossibilidade de cultivo gera problemas na análise do metabolismo e função ecológica dos micro-organismos, deixando vagas as inferências sobre o papel deles em seus respectivos ambientes. As técnicas moleculares têm ajudado muito a preencher essas lacunas e detectam e identificam sequências de DNA específicas de micro-organismos em qualquer amostra ambiental, independentemente se estiverem dentro de células vivas, mortas ou em estado de dormência. Desde que foram estabelecidas, em meados da década de 1980, muitos grupos novos de micro-organismos foram descobertos através desses métodos. Com técnicas cada vez mais sofisticadas, como o sequenciamento de genoma de células únicas, utilizando-se DNA

extraído de células isoladas, assim como as análises de proteoma e transcriptoma, a biologia molecular é uma das grandes potencializadoras da pesquisa astrobiológica. Um exemplo dessa pesquisa é o estudo do genoma e transcriptoma da bactéria *Exiguobacterium antarcticum* B7. Essa bactéria, que pode crescer em ampla faixa de temperatura (20 a 41 °C), foi isolada pelos pesquisadores do Instituto Oceanográfico (IO-USP) na Antártica, em um projeto com pesquisadores da rede genômica da Universidade Federal do Pará (UFPA). Como resultado, eles descreveram quais genes da bactéria são expressos em temperatura de 0 °C e quais são responsáveis pela resistência da bactéria ao frio.

Os segredos enterrados na Antártica

O lago Vostok, na região oeste da Antártica, é um dos ambientes mais misteriosos já identificados. Trata-se de um lago subglacial, isto é, coberto por uma camada de gelo de aproximadamente 3,6 km de espessura. Apesar disso, a água do lago permanece no estado líquido. Os cientistas especulam que talvez haja uma fonte de água termal no leito do Vostok, similar aos gêiseres e fontes hidrotermais de oceano profundo. Calcula-se que o lago está isolado da atmosfera desde a formação do manto de gelo antártico, que se iniciou há 30 milhões de anos. Desde que foi descoberto em meados da década de 1960, os cientistas levantam questões sobre a existência de vida no lago Vostok e, em caso positivo, surge a pergunta: que formas os seres de lá tomaram após milhões de anos evoluindo independentemente da biosfera terrestre? A resposta poderia ser alcançada da forma mais simples – indo até lá e coletando amostras do lago. Cientistas russos começaram as perfurações alguns anos após sua descoberta, mas foi interrompida em janeiro de 1998 por pressão da comunidade científica, que exigia cuidados adicionais nos métodos de perfuração para evitar a contaminação do lago com micro-organismos externos. Mais de 10 anos depois, com a questão ambiental resolvida, os russos continuaram a perfuração e, em 5 de fevereiro de 2012, concluíram um dos feitos mais extraordinários e complexos da ciência: alcançaram o

lago Vostok, 3.769 m abaixo do gelo antártico. As amostras do lago estão sob análise, e o grande mistério da vida em um dos últimos lugares inexplorados da Terra está sendo resolvido (Figura 8.4).

Bactérias e outros micro-organismos já foram detectados (e cultivados) a partir de testemunhos de gelo coletados durante a perfuração do lago (Shtarkman et al., 2013). Muitas delas mostraram-se organismos psicrofílicos, ou seja, extremófilos adaptados a ambientes frios e capazes de sobreviver a temperaturas abaixo de 0 °C. Isso não significa, necessariamente, que há vida no interior do misterioso lago, mas já é um grande achado a descoberta de micro-organismos sobrevivendo sob 3,6 km de gelo antártico. Entretanto, outra descoberta chamou mais a atenção: na interface entre o lago e o manto de gelo antártico, há um tipo de gelo específico chamado de gelo de acreção, ou seja, a água do próprio lago que congelou quando em contato com a geleira. Essa camada de gelo contém, portanto, evidências do que há no interior do lago. Através de métodos moleculares, uma equipe de cientistas europeus encontrou preservada no gelo de acreção moléculas de DNA similares ao da *Hydrogenophilus thermoluteolus*, uma bactéria termofílica que só é encontrada nas ferventes fontes hidrotermais oceânicas (Lavire et al., 2006). Embora a bactéria não tenha sido isolada e cultivada, os cientistas consideram o achado como uma forte evidência de que haja um sistema geotermal no leito do lago, que mantém sua água em estado líquido.

Os segredos do lago Vostok são preciosos para a astrobiologia porque o lago subglacial é considerado como um ambiente análogo ao da lua Europa, uma das quatro luas descobertas em 1610 por Galileu Galilei ao apontar o telescópio para o planeta Júpiter. Europa é uma lua formada por um núcleo rochoso, similar ao da Terra, composto de silicato e ferro. Sua superfície é formada por uma camada de 100 km de gelo e uma tênue atmosfera rica em oxigênio. Abaixo do gelo, os cientistas apontam a existência de um vasto oceano de água líquida e salgada, de volume quase duas vezes maior que os oceanos da Terra. Essa configuração é muito similar à do lago Vostok – um grande corpo de água líquida

isolado da atmosfera por uma espessa camada de gelo. Se a vida for confirmada no Vostok, os cientistas poderão utilizá-la como modelo para uma possível vida extraterrestre em Europa.

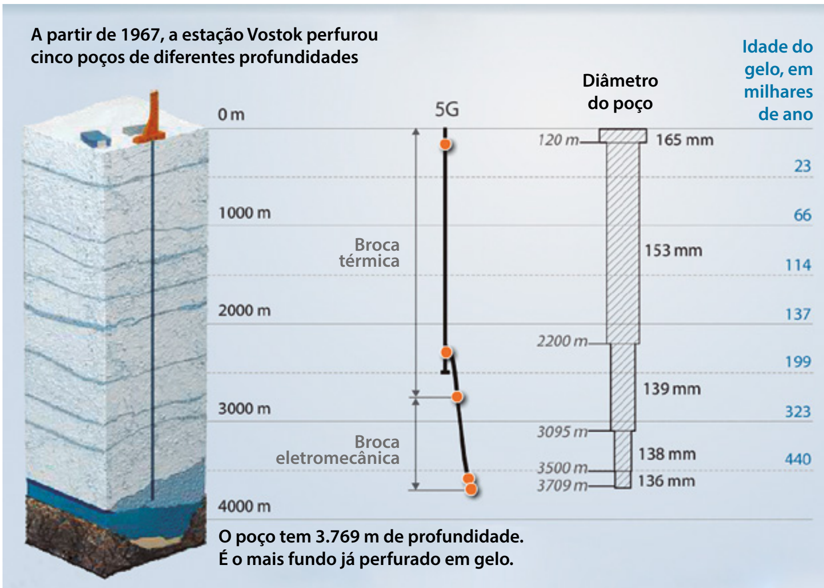


Figura 8.4. Perfil da perfuração do Lago Vostok, na Antártica. Fonte: Sputnik/ Ria Novosti/Glow Images

Sondar os limites em que a vida prolifera na Terra pode fornecer informações importantes sobre as probabilidades de encontrá-la em ambientes extraterrenos. Sendo assim, estudar ambientes extremos de nosso próprio planeta ajuda a entender a variabilidade metabólica e o poder de adaptação de organismos a diferentes gradações ambientais, definindo fronteiras de habitabilidade para as formas de vida que conhecemos.

Referências

Abrevaya, X. C. et al. Comparative survival analysis of Deinococcus radiodurans and the Haloarchaea Natrialba magadii and Haloferax volcanii, exposed to vacuum ultraviolet irradiation. *Astrobiology*, v. 11, p. 1034-1040, 2011.

Brock, T. D. Life at high temperatures. *Science*, v. 158, n. 3804, p. 1012-1019, 1967.

Christner, B. C. et al. Limnological conditions in Subglacial Lake Vostok. *Limnology and Oceanography*, v. 51, n. 6, 2006.

Danovaro, R. et al. Major viral impact on the functioning of benthic deep-sea ecosystems. *Nature*, v. 454, n. 7208, p. 1084-1087, 2008.

Duarte, R. T. D. *Micro-organismos em ambientes criogênicos*: gelo glacial, solos expostos por recuo de geleiras, e permafrost polares. 2010. 201f. Tese (Doutorado em Biotecnologia) – Instituto de Ciências Biomédicas, Universidade de São Paulo.

Gilichinsky, D. et al. (Ed.) Bacteria in Permafrost. In: *Psychrophiles*: from Biodiversity to Biotechnology, p. 83-102, 2008.

Horneck, G.; Bücker, H.; Reitz, G. Long-term survival of bacterial spores in space. *Advances in space research*, v. 14, p. 41-45, 1994.

Kallmeyer, J. et al. Global distribution of microbial abundance and biomass in subseafloor sediment. *PNAS*, v. 109, n. 40, p. 16213-16216, 2012.

Lavire, C. et al. Presence of Hydrogenophilus thermoluteolus dna in accretion ice in the subglacial Lake Vostok, Antarctica, assessed using rrs, cbb and hox. *Environmental Microbiology*, v. 8, n. 12, p. 2106-2114, 2006.

Mason, O. U. et al. First Investigation of the Microbiology of the Deepest Layer of Ocean Crust. *PLoS One*, v. 5, n. 11, 2010.

Miteva, V. I.; Brenchley, J. E. Detection and isolation of ultrasmall microorganisms from a 120,000-year-old Greenland glacier ice core. *Applied and Environmental Microbiology*, v. 71, n. 12, p. 7806-7818, 2005.

Ntougias, S. et al. Ecophysiology and molecular phylogeny of bacteria isolated from alkaline two-phase olive mill wastes. *Research in microbiology*, v. 157, n. 4, p. 376-385, 2006.

ONOFRI, S. et al. Survival of rock-colonizing organisms after 1.5 years in outer space. *Astrobiology*, v. 12, n. 5, p. 508-516, 2012.

PARRO, V. et al. A microbial oasis in the hypersaline Atacama subsurface discovered by a life detector chip: implications for the search for life on Mars. *Astrobiology*, v. 11, n. 10, p. 969-996, 2011.

POPA, R. et al. Olivine-respiring bacteria isolated from the rock-ice interface in a lava-tube cave, a Mars analog environment. *Astrobiology,* v. 12, n. 1, p. 9-18, 2012.

RODRIGUES, D. F. et al. Characterization of Exiguobacterium isolates from the Siberian permafrost. Description of Exiguobacterium sibiricum sp. nov. *Extremophiles*, v. 10, n. 4, p. 285-294, 2006.

SANCHO, L. G. et al. Lichens survive in space: results from the 2005 Lichens Experiment. *Astrobiology*, v. 7, n. 3, p. 443-454, 2007.

SCHIPPERS, A. L. N. et al. Prokaryotic cells of the deep sub-seafloor biosphere identified as living bacteria. *Nature*, n. 433, p. 861-864, 2005.

SCHLEPER, C. et al. Picrophilus gen. nov., fam. nov.: a novel aerobic, heterotrophic, thermoacidophilic genus and family comprising archaea capable of growth around pH 0. *Jounal of Bacteriology*, v. 177, n. 24, p. 7050-7059, 1995.

SHTARKMAN, Y. M. et al. Subglacial Lake Vostok (Antarctica) accretion ice contains a diverse set of sequences from aquatic, marine and sediment-inhabiting bacteria and eukarya. *PLoS One*, v. 8, n. 7, 2013.

WASSMANN, M. et al. Survival of spores of the UV-resistant Bacillus subtilis strain MW01 after exposure to low-earth orbit and simulated martian conditions: data from the space experiment ADAPT on EXPOSE-E. *Astrobiology*, v. 12, n. 5, p. 498-507, 2012.

METABOLISMOS POUCO CONVENCIONAIS

Capítulo 9

André Arashiro Pulschen

Introdução

A definição exata de metabolismo não é óbvia. Podemos considerar como metabolismo todas as transformações e reações químicas que ocorrem dentro de um organismo vivo, normalmente envolvendo enzimas, e que asseguram a manutenção e o crescimento celular, através da síntese ou degradação de moléculas. Com uma definição tão geral, é fácil de se imaginar que a quantidade de diferentes metabolismos existentes é extremamente vasta. Certas vias metabólicas mais basais, como a degradação da glicose, são relativamente conservadas e abundantes, porém certos metabolismos podem ser considerados como "exóticos" e pouco convencionais, ocorrendo principalmente em procariotos.

Metabolismos não convencionais não são tão raros assim em nosso planeta. Isso porque a definição de convencional parte de nós, humanos, apenas uma das milhares de espécies que existem

na Terra. Consideramos como *convencionais* nossos próprios metabolismos e aqueles dos organismos próximos de nossa realidade, como outros animais e plantas. Porém, ao examinarmos com cuidado certos animais, plantas e micro-organismos, veremos que a quantidade de diferentes vias metabólicas distintas das consideradas convencionais são muitas e bem diversificadas.

Este capítulo irá se concentrar apenas em metabolismos não convencionais energéticos (ou seja, geração de ATP e de poder redutor). Isso porque existe uma enorme gama de vias metabólicas diferentes e, para cada uma delas, metabolismos que podem ser considerados pouco convencionais. Como exemplo podemos citar a síntese de alguns aminoácidos exóticos por arqueias ou então a síntese de cristais magnéticos por bactérias magnetotáticas. Seria pouco prático abordar todos esses metabolismos diferenciados em apenas um capítulo.

Além disso, a bioenergética "alternativa" tem um apelo interessante para a astrobiologia: temos buscado por sinais de vida em nosso Sistema Solar e em outros corpos celestes que sejam habitáveis. Porém, mesmo que encontremos uma lua ou planeta onde as temperaturas sejam relativamente parecidas com as nossas (Marte, por exemplo), ou então com grande abundância de água (Europa e Ganimedes), seja em nosso Sistema Solar ou em outro, existe uma condição que dificilmente será reproduzida: nossa grande quantidade de oxigênio livre na atmosfera, criando um ambiente planetário majoritariamente oxidante.

No caso do nosso planeta, o oxigênio é uma assinatura muito evidente da vida. Tamanha é a importância do oxigênio, que a maioria dos metabolismos existentes depende desse gás. Por exemplo, considera-se hoje que praticamente não existem organismos multicelulares anaeróbicos (isto é, que não respiram oxigênio). Logo, tudo aquilo que é vivo e é visto a olho nu (pássaros, plantas, peixes, pessoas etc.) é aeróbio. Se quisermos ter chances de encontrar vida semelhante à nossa em outro corpo celeste, precisamos procurar por metabolismos energéticos "não convencionais", diferente daquilo que estamos acostumados a observar normalmente e diferente de como nós somos. Isto é, devemos pensar

em formas de vida e ecossistemas que necessitam de oxigênio e não dispõem de abundância de matéria orgânica, porém ainda assim seja capaz de produzir ATP de forma eficiente. Vidas e ecossistemas que não dependam de carbono orgânico originado de fotossíntese oxigênica, como a realizada pelas plantas, porém que tenham alternativas viáveis para obter poder químico redutor o suficiente para transformar carbono inorgânico em orgânico.

Para entendermos melhor esse ponto, podemos levantar a seguinte problemática: supondo que os vastos oceanos submersos da lua de Júpiter, Europa, tenham temperaturas e salinidade similares aos nossos. Logo, começaríamos a imaginar se existem peixes por lá. Bom, caso existam, esses "peixes de Europa" precisariam ser capazes de respirar anaerobicamente, uma vez que praticamente todo o gás oxigênio que existe em nosso planeta é fruto da fotossíntese, e é pouco provável que exista em concentrações significativas em qualquer outro corpo de nosso Sistema Solar.

De fato, nosso planeta já passou por um período anóxico, sem a presença massiva do oxigênio gasoso. Durante o período do surgimento da vida até o aparecimento das cianobactérias e a oxidação da crosta, cerca de 2,1 bilhões de anos atrás, a vida na Terra existiu em um ambiente sem oxigênio, e os organismos produtores primários não eram fotossintetizantes oxigênicos. Talvez um tipo de vida similar ao que imaginamos que podemos encontrar em outros planetas. Sendo assim, o entendimento dos metabolismos não convencionais é importante para a busca de vida extraterrestre, mas também essencial para o entendimento da vida passada em nosso planeta, e mesmo a vida atual em ambientes extremos.

Serão apresentados a seguir exemplos de diferentes metabolismos energéticos existentes em nosso planeta, os quais não estão conectados ou não dependem do oxigênio e nem da fotossíntese oxigênica, além de discutidas suas possíveis implicações para a astrobiologia.

Metabolismo energético e produção de ATP

Para se manter vivo, um organismo precisa, resumidamente, realizar duas "tarefas" metabólicas: produzir energia e assimilar

carbono. Nos sistemas vivos ocorrem diversas reações metabólicas energeticamente não favoráveis. A fim de tornar essas reações termodinamicamente possíveis, as células usam reações acopladas. A mais comum delas é o acoplamento das reações com uma reação de quebra do ATP, produzindo ADP + fósforo inorgânico (P_i). Tal acoplamento de reações é extremamente eficiente e está presente em praticamente todos os metabolismos conhecidos hoje em dia; por isso o ATP é conhecido como a moeda de troca energética para a vida como a conhecemos. Para a produção das moléculas de ATP, existem duas vias possíveis: fosforilação a nível de substrato e a cadeia transportadora de elétrons.

O exemplo mais clássico de fosforilação em termos de substrato é a glicólise. A quebra da glicose em duas moléculas de piruvato consome 2 moléculas de ATP, porém produz 4 moléculas de ATP. Dessa forma, o saldo dessa reação são 2 ATPs. A conhecida fermentação (que ocorre em nossos músculos quando nos exercitamos em excesso ou na produção de bebidas alcoólicas) consiste apenas em uma etapa de reciclagem de NADH a NAD^+, necessária para a continuidade da glicólise, uma vez que necessita transformar NAD^+ em NADH para ocorrer. Portanto, a fermentação em si não produz ATP. Ela é apenas necessária para a continuidade do metabolismo glicolítico.

Já a cadeia transportadora de elétrons é um mecanismo muito mais complexo de produção de ATP. Basicamente, inicia com uma molécula que será a doadora de elétrons. Esse elétron doado é constante e gradativamente transferido a diferentes proteínas de membrana (citocromos, proteínas ferro-enxofre e quinonas). A cada etapa de transferência desse elétron, íons H^+ são bombeados para fora da membrana, criando assim um gradiente de prótons. Ao fim da cadeia transportadora de elétrons está um aceptor de elétrons, normalmente por uma redutase (oxigênio redutase, nitrato redutase etc.). No caso dos humanos, o aceptor final de elétrons é o oxigênio, que é reduzido em água. A presença constante do aceptor final de elétrons é importante para permitir o constante fluxo de elétrons na cadeia transportadora, similar a uma corrente

elétrica. Se não existirem aceptores finais de elétrons, a cadeia transportadora para, e o bombeamento de prótons é interrompido.

Os prótons que foram bombeados para fora da célula acabam retornando para seu interior. Porém, não são capazes de atravessar a membrana plasmática. Só conseguem fazer isso através de uma proteína especial similar a um canal, chamada de ATP sintase. Essa proteína aproveita a força gerada pelo gradiente de prótons e, com a passagem dos íons H^+ de volta para o citoplasma, a energia é utilizada para a síntese de ATP, a partir de ADP + P_i. Um esquema ilustrativo de uma cadeia transportadora de elétrons está apresentado na Figura 9.1.

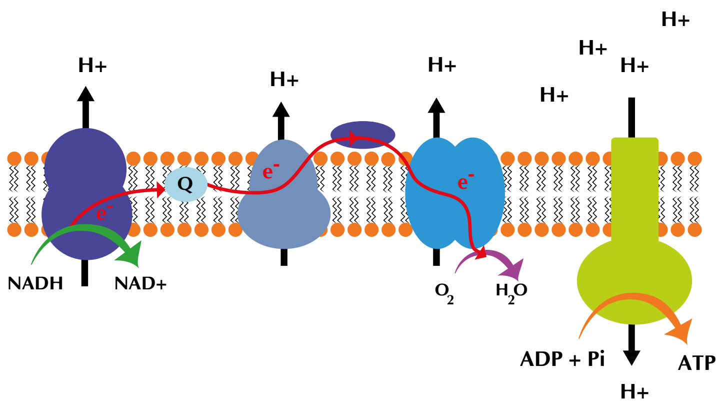


Figura 9.1. Ilustração da cadeia transportadora de elétrons. Fonte: Elaborado pelo autor

Porém, para poder ocorrer a cadeia de transporte de elétrons é necessário que a molécula doadora de elétrons tenha um potencial de oxidação maior do que a molécula aceptora de elétrons. O funcionamento é similar a uma pilha: o fluxo de elétrons vai no sentido do metal com menor potencial de redução (isto é, menor afinidade de elétrons) para o metal de maior potencial de redução (maior afinidade por elétrons). No caso ilustrado na Figura 9.1, que é a cadeia transportadora que ocorre nas mitocôndrias, o doador de elétrons é o NADH, obtido pela oxidação da matéria orgânica. O aceptor final de elétrons é o oxigênio. Se observarmos uma tabela que contém

os potenciais-padrão de redução de diferentes pares redox (Tabela 9.1), podemos ver que o potencial de redução do par NAD/NADH é muito menor do que o potencial de redução do par O_2/H_2O. Dessa forma, o sentido dos elétrons é extremamente favorecido de NADH para oxigênio. É importante ressaltar que quanto maior essa diferença entre os potenciais de redução, maior a quantidade de prótons bombeados e, portanto, maior o rendimento de produção de ATP.

Tabela 9.1. Diferentes potenciais de redução de pares redox (pH 7)

Par redox	E'0 (mV)
H^+/H_2	- 414
NAD/NADH	- 320
S^0/HS^-	- 270
$FAD/FADH_2$	- 220
NO_3^-/NO_2^-	+ 433
Fe^{+3}/Fe^{+2}	+ 772
O_2/H_2O	+ 818

Fonte: Dados retirados do trabalho de Thauer, Jungermann e Decker (1977)

Além da produção de ATP, as células necessitam de carbono orgânico para a manutenção e crescimento celular. Muitos organismos obtêm esse carbono do consumo de matéria orgânica (metabolismo heterótrofo), porém os organismos produtores (metabolismos autotróficos) conseguem fixar o CO_2 atmosférico, convertendo carbono da forma inorgânica para a forma orgânica. Para isso, necessitam de poder redutor, isto é, uma molécula capaz de reduzir o CO_2 atmosférico e o incorporar em uma cadeia carbônica orgânica, sendo o NADPH a molécula mais comumente utilizada nesse processo.

Metabolismos energéticos "convencionais"

Podemos considerar como convencional os metabolismos energéticos aos quais estamos acostumados, ou seja, a obtenção de energia e carbono através do consumo de matéria orgânica (predatismo, decomposição etc.) e da respiração aeróbia, ou através da

fotossíntese. Basicamente, consiste nos metabolismos que ocorrem em uma clássica cadeia ou teia alimentar.

No caso do metabolismo de consumidores, a produção de ATP é realizada através da cadeia tranportadora de elétrons, sendo o doador de elétrons a coenzima NADH (originada da oxidação de compostos orgânicos reduzidos) e o aceptor final de elétrons o oxigênio. A energia também pode ser produzida em termos de substrato, através da fermentação, porém a eficiência de produção de ATP é mais limitada nesse caso. O carbono utilizado para o crescimento celular também é obtido pela matéria orgânica. Esse é o metabolismo existente nos seres humanos e em todos os animais existentes, por exemplo.

Já no caso da fotossíntese como a conhecemos, também chamada de fotossíntese oxigênica, o doador de elétrons é a água. A água sofre fotólise (quebra na presença de luz), liberando assim oxigênio, um próton e um elétron. Esse elétron é então transportado através da cadeia transportadora de elétrons até uma $NADP^+$ redutase, que transforma o $NADP^+$ em NADPH (não deve ser confundida NADH com NADPH). Assim, o aceptor final de elétrons nesse caso é o NADPH, e os prótons, bombeados para fora durante o transporte de elétrons, são então usados para a produção de ATP. A seguir, um esquema resumido da fotossíntese oxigênica (Figura 9.2).

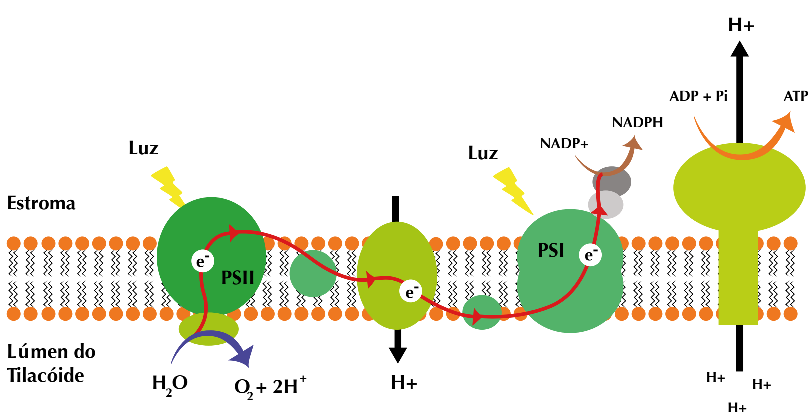


Figura 9.2. Esquema ilustrativo da fotossíntese oxigênica. Fonte: Elaborado pelo autor

A formação de NADPH na fotossíntese tem um propósito – a constituição da molécula também é chamada de formação de poder redutor. Isso porque o NADPH é essencial para a fixação do CO_2 atmosférico (na maioria dos metabolismos de fixação de CO_2). Logo, a fotossíntese oxigênica tem como propósito produzir ATP e gerar poder redutor, para permitir a conversão de CO_2 em carbono orgânico.

Podemos, portanto, resumir os metabolismos energéticos convencionais como sendo os três apontados a seguir: 1) consumo de matéria orgânica e respiração aeróbia, na qual compostos orgânicos permitem a obtenção de carbono e produção de ATP; 2) fermentação, que permite a produção de ATP a partir de compostos orgânicos, mas de forma menos eficiente; 3) fotossíntese, na qual o ATP é produzido através da fotólise da água, e CO_2 atmosférico é fixado, fazendo-se uso de poder redutor.

Serão abordados agora metabolismos energéticos que fogem desses três metabolismos mais comuns. Tais metabolismos "não convencionais" ocorrem principalmente em bactérias e arqueias, e muitos deles remetem (e talvez se originaram) a períodos antigos de nosso planeta, com química diferente da atual e, em especial, em ambiente anóxico.

Metabolismos energéticos pouco convencionais

Respiração anaeróbia

A respiração anaeróbia consiste em uma cadeia transportadora de elétrons em que o aceptor final não é o oxigênio, mas sim outro composto capaz de receber esses elétrons, como o nitrato. É comum a confusão entre fermentação e respiração anaeróbia. A primeira produz ATP apenas pela glicólise, não faz uso da cadeia transportadora de elétrons e é pouco eficiente. Já a respiração anaeróbia faz uso da cadeia transportadora, e a produção de ATP é muito mais eficiente do que na fermentação.

A respiração anaeróbia é comum no ambiente microbiano e vários organismos, como os *Escherichia coli* e *Bacillus subtilis* são capazes de realizá-la (Nakano; Zuber, 1998; Unden; Bongaerts,

1997). Apesar de esses organismos crescerem aerobicamente, em condições anaeróbicas são capazes de sintetizar as redutases necessárias para realizar a respiração anaeróbia, sendo a mais comum nesse caso através da utilização de nitrato como o aceptor final – uma nitrato redutase transforma o nitrato (NO_3^-) em nitrito (NO_2^-).

Em teoria, qualquer composto pode ser "respirado" pelas células. Bastam duas condições: o aceptor final de elétrons em questão (composto a ser respirado) deve ter potencial de redução maior do que o composto doador de elétrons (E'_0 maior), e a célula deve ser capaz de sintetizar uma redutase que pode transferir os elétrons do doador de elétrons para esse aceptor final em questão. No caso da respiração aeróbia, uma oxigênio redutase é quem transfere o elétron para o oxigênio, reduzindo-o em água.

De fato, são encontrados na natureza diversos elementos químicos que agem como aceptores finais de elétron nas cadeias respiratórias anaeróbias. Por exemplo, existem organismos capazes de respirar sulfato (Muyzer; Stams, 2008), selênio (Zher; Oremland, 1987), arsênico (Stolz; Oremland, 1999), ferro (Dubiel et al., 2002) e até mesmo urânio (Koribanics et al., 2015). Porém, todos esses organismos são unicelulares. Praticamente não existem exemplos de organismos multicelulares que realizam respiração anaeróbia. Virtualmente todos os multicelulares que conhecemos hoje são aeróbios e, no melhor dos cenários, capazes de viver em baixas tensões de oxigênio, ou então por breves períodos da vida em anoxia. Existem propostas de que a origem da multicelularidade na história da vida está diretamente relacionada ao surgimento do metabolismo aeróbico, capaz de liberar mais energia que sua contraparte anaeróbica.

Existem alguns poucos exemplos de organismos que podem ser considerados "multicelulares" e anaeróbios. Como destaque, podemos mencionar a bactéria *Candidatus Magnetoglobus multicellularis* (Abreu et al., 2007). O ciclo de vida desse organismo em particular é totalmente na forma multicelular, e a divisão celular também ocorre de modo coordenado, sendo que todas as células que compõem o organismo se dividem ao mesmo tempo. Além

disso, qualquer célula que seja removida do grupo acaba perdendo a viabilidade, e, aparentemente, o único modo de vida desse organismo é na forma multicelular. Por ser um organismo magnetotático, pode se orientar através de campos magnéticos. Para nadar em uma mesma direção, os movimentos flagelares de todos os "integrantes" do organismo devem estar coordenados, o que sugere também complexa coordenação e comunicação celular.

Porém, como já foi dito, o número de organismos que podemos considerar como multicelulares e anaeróbios é muito pequeno. Apesar de recentemente três metazoários terem sido encontrados em uma região anóxica do Mar Morto e ter sido sugerido que são anaeróbios (Danovaro et al., 2010), a falta de estudos posteriores e a dificuldade de obtenção das amostras impede a confirmação do metabolismo anaeróbio desses organismos.

Mas, então, por que não existem organismos anaeróbios multicelulares, uma vez que a respiração anaeróbia também pode ser eficiente na produção de ATP? A resposta para essa questão está na abundância. O oxigênio se tornou muito abundante em nosso planeta quando a vida ainda era recente, por causa do surgimento da fotossíntese oxigênica. Dessa forma, muito oxigênio foi produzido e acabou se acumulando na atmosfera após o esgotamento das fontes minerais reduzidas da crosta, o que foi extremamente tóxico para organismos obrigatoriamente anaeróbios. Essa abundância de oxigênio acabou extinguindo boa parte dos micro-organismos existentes, e talvez até os primeiros possíveis multicelulares anaeróbios. Além disso, o oxigênio apresenta uma grande vantagem em relação aos outros aceptores finais de elétrons: está em toda a atmosfera e também dissolvido na água dos oceanos, o que o torna muito mais abundante e disponível do que qualquer um dos outros compostos listados anteriormente. Uma vez que a vida evoluiu de forma a respirar oxigênio, a variedade de habitats possíveis de serem utilizados se elevou, além de se considerar que o rendimento de produção de ATP através da respiração aeróbia é mais elevado que as alternativas anaeróbias. Dessa forma, o surgimento de organismos multicelulares aeróbios foi favorecido, em

detrimento dos anaeróbios, cujos habitats possíveis acabaram por se tornar restritos.

Quimiolitotróficos

Organismos quimiolitotrófricos são organismos capazes de produzir ATP ou com poder redutor, a partir de compostos químicos inorgânicos. No caso da produção de ATP, não importa o aceptor final de elétrons (oxigênio, urânio ou qualquer outro), mas sim o doador de elétrons, que nesse caso não é um composto orgânico. O padrão básico de produção de energia e poder redutor segue, portanto, a mesma lógica de outras formas de vida, porém se baseia agora em compostos inorgânicos (Peck, 1968).

Considerando-se a produção de ATP, a cadeia transportadora de elétrons dos organismos quimiolitotróficos conta com enzimas capazes de remover elétrons de compostos orgânicos reduzidos. De fato, uma vasta gama de compostos químicos reduzidos podem ser utilizados no metabolismo quimiolitotrófico, conforme ilustrado na Tabela 9.2.

Tabela 9.2. Diferentes micro-organismos e reações quimiolitotróficas

Bactéria	Reação
Nitrosomonas europea	$2\ NH_4^+ + 3\ O_2 \rightarrow 2\ NO_2^- + 2H_2O$
Nitrobacter winogradskyi	$2\ NO_2^- + O_2 \rightarrow 2\ NO_3^-$
Cupriavidus necator	$2\ H_2 + O_2 \rightarrow 2\ H_2O$
Pseudomonas carboxydovorans	$2\ CO + O_2 \rightarrow 2\ CO_2$
Acidithiobacillus thiooxidans	$2\ S^\circ + 3\ O_2 + 2\ H_2O \rightarrow 2\ SO_4^{2-} + 4\ H^+$
Acidithiobacillus ferrooxidans	$4\ Fe^{2+} + O_2 + 4\ H^+ \rightarrow 4\ Fe^{3+} + 2\ H_2O$
Leptothrix spp.	$2\ Mn^{2+} + O_2 + H_2O \rightarrow 2\ MnO_2 + 4\ H^+$
Paracoccus denitrificans	$5\ H_2 + 2\ NO_3^- + 2\ H^+ \rightarrow 6\ H_2O + N_2$
Desulfovibrio desulfuricans	$4\ H_2 + SO_4^{2-} + 2\ H^+ \rightarrow H_2S + 4\ H_2O$
Methanobacterium termoautrotrophicum	$4\ H_2 + HCO_3^- + H^+ \rightarrow CH_4 + 3\ H_20$

O metabolismo de produção de ATP é o mesmo já explicado: o elétron, fornecido pelo doador de elétrons, é transportado através da cadeia transportadora e, nesse processo, prótons são bombeados para fora da célula e retornam então pela ATP sintetase, produzindo assim ATP a partir de ADP + fósforo inorgânico. O aceptor final de elétrons pode ser tanto o oxigênio, como qualquer um dos outros possíveis aceptores discutidos anteriormente.

Todavia, a produção de poder redutor através de metabolismo quimiolitotrófico é diferente. Para a geração de NADPH a partir de compostos inorgânicos é necessário que o elétron ande no sentido reverso da cadeia transportadora de elétrons. Isso porque grande parte dos compostos químicos reduzidos utilizados pelos quimiolitotróficos para a geração de ATP tem maior afinidade por elétrons do que o par NADP+/NADPH. Portanto, a tendência é que o NADPH perca elétron para esses compostos, e não que o $NADP^+$ receba elétrons. Basicamente, é como tentar forçar que o ouro oxide e reduza um outro metal, como a prata, por exemplo (o que não ocorre naturalmente).

Logo, a célula necessita empregar ATP para "forçar" o elétron a ir no sentido contrário ao esperado, sendo esse ATP inicial gerado na cadeia transportadora de elétrons. Por fim, uma $NADP^+$ redutase reduz o $NADP^+$ a NAPDH, permitindo assim que o organismo use esse composto para a fixação de CO_2 atmosférico, seja pelo ciclo de Calvin, ou pelo ciclo do ácido cítrico reverso. Um esquema simplificado da produção de ATP e poder redutor em um metabolismo quimiolitotrófico está ilustrado na Figura 9.3.

Um fato importante a ser considerado é que, quanto maior o potencial de redução do composto doador de elétron, maior a quantidade de ATP que deverá ser empregada para forçar esse elétron a ser doado para o NADPH. Por exemplo, a bactéria *Acidithiobacillus ferrooxidans*, além de ser capaz de crescer a partir da oxidação de enxofre elementar, consegue crescer através da oxidação de Fe^{+2}, fixando CO_2 e produzindo ATP. Devido a esse metabolismo, é um importante organismo modelo para quimiolitotróficos e tem sido estudada e aplicada nas áreas de biotecnologia e bioprospecção (Nemati et al., 1998; Yang et al., 2009). Porém, é um metabolismo

extremamente pouco eficiente, uma vez que produz muito pouco ATP (diferença muito pequena entre o potencial de redução do par redox Fe^{+2}/Fe^{+3} e o aceptor final de elétrons, O_2/H_2O) e gasta uma grande quantidade de ATP para gerar poder redutor (grande diferença entre o potencial de redução do par redox Fe^{+2}/Fe^{+3} e o aceptor final $NADP^{+}/NADPH$). Logo, o aumento de biomassa desse organismo crescendo em ferro é muito menor do que se estivesse crescendo em enxofre elementar, por exemplo.

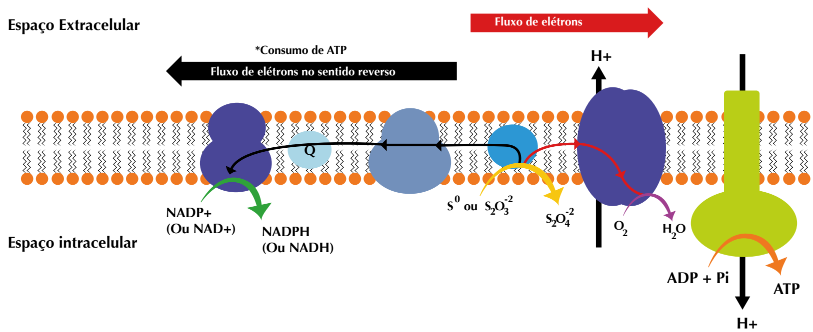


Figura 9.3. Esquema ilustrativo da produção de ATP e também de poder redutor em organismos quimiolitotróficos. Nesta ilustração em especial estão apresentadas diferentes espécies químicas de enxofre. Fonte: Elaborado pelo autor

O metabolismo quimiolitotrófico corresponde, em nosso planeta, a uma alternativa à fixação de carbono inorgânico da fotossíntese. Isso quer dizer que ecossistemas inteiros podem ser baseados em produtores que não dependem da luz do Sol. Isso é extremamente importante quando pensamos em ecossistemas em cavernas ou então no fundo de oceanos. De fato, diversas comunidades já foram descritas em tais ambientes, todas dependentes de quimiolitotróficos como produtores (Jannasch; Wirsen, 1981; Northup; Lavoie, 2001).

Fotossíntese anoxigênica

A fotossíntese anoxigênica consiste em uma fotossíntese na qual não se tem a produção de oxigênio como um dos produtos finais, daí o seu nome. O oxigênio produzido pela fotossíntese

oxigênica é proveniente da fotólise da água (doador de elétrons); portanto, o doador de elétrons também é diferente no caso da fotossíntese anoxigênica.

Na verdade, apesar de menos conhecida, acredita-se que a fotossíntese anoxigênica foi a primeira a surgir nos organismos vivos. Esse tipo de fotossíntese depende apenas de um fotossistema, ao passo que a fotossíntese oxigênica depende de dois fotossistemas, tendo provavelmente sido originada a partir da primeira e aperfeiçoada para ser capaz de oxidar a água (Cardona et al., 2015). O surgimento da fotossíntese (anoxigênica) foi uma grande vantagem evolutiva, uma vez que permite a produção de ATP a partir da luz e sem o gasto de compostos químicos reduzidos ou material orgânico, de modo que poderiam ser destinados exclusivamente para a geração de poder redutor ou diretamente para a biossíntese de moléculas e crescimento celular.

A fotossíntese anoxigênica pode ser de dois tipos: cíclica, na qual ocorre apenas a produção de ATP; e não cíclica, na qual, além da produção de ATP, temos a geração de poder redutor, porém com o uso de algum composto químico reduzido, como o sulfito de hidrogênio.

Na fotossíntese anoxigênica cíclica (Figura 9.4), podemos considerar como doador de elétrons o próprio fotossistema I. O elétron é excitado pela ação da luz e, similarmente a outras cadeias transportadoras de elétrons, é transportado pelas quinonas e citocromos, sendo gerado um gradiente de prótons nesse processo, que é utilizado para a produção de ATP. Ao final do ciclo, o elétron retorna ao fotossistema I (que pode ser considerado então o aceptor final de elétrons). Como saldo, tem-se a produção de ATP, mas não de poder redutor, uma vez que moléculas como $NADP^+$, utilizadas para a fixação de CO_2, não são aceptores finais de elétrons.

Já na fotossíntese anoxigênica não cíclica, um composto reduzido (H_2 ou H_2S, por exemplo) age como o doador de elétrons. Nesse cenário, o aceptor final de elétrons pode ser o $NADP^+$, gerando assim poder redutor e possibilitando a fixação de CO_2.

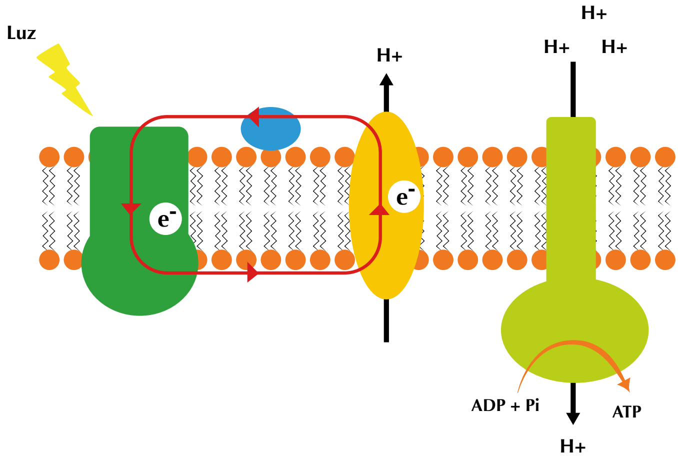


Figura 9.4. Esquema simplificado da fotossíntese anoxigênica cíclica. Fonte: Elaborado pelo autor

Como micro-organismos capazes de realizar fotossíntese anoxigênica, podemos listar as bactérias púrpuras do enxofre e púrpuras não sulfurosas, bactérias verdes do enxofre, bactérias do gênero *Heliobacter* e *Chloroflexi* (Bryant; Frigaard, 2006; Frigaard; Dahl, 2009). Até mesmo cianobactérias, como algumas espécies do gênero *Oscillatoria*, são capazes de realizar fotossíntese anoxigênica em regiões anaeróbias. Como exemplo, a primeira descrição de fotossíntese anaeróbia dependente de sulfito foi relatada em uma espécie de *Oscillatoria* (Cohen; Padan; Shilo, 1975). Outro grande destaque foi a descoberta de membros do mesmo gênero capazes de realizar fotossíntese anoxigênica a partir de arsênio, As(III), encontradas no lago Mono na Califórnia, Estados Unidos (Kulp et al., 2008), que é anóxico e também rico em sulfito. Tais adaptações tiveram muita importância evolutiva para o gênero, uma vez que altas concentrações de sulfito de hidrogênio inibem o funcionamento do fotossistema II e inviabilizam a fotossíntese oxigênica (Jogensen; Cohen; Revsbech, 1986). A capacidade de realizar a fotossíntese anoxigênica aumentou então a gama de nichos em que esses organismos são capazes de ocupar.

Por fim, similar ao ponto levantado anteriormente em relação à respiração aeróbia, cabe aqui mais uma vez um importante

questionamento evolutivo: por que é mais comum encontrarmos a fotossíntese oxigênica, e por que não existem grandes "plantas" que realizam fotossíntese anoxigênica?

A resposta é a mesma para o questionamento da respiração aeróbia: abundância. A fotossíntese anoxigênica é incapaz de gerar poder redutor, e para isso depende do uso de compostos químicos reduzidos e da cadeia transportadora de elétrons reversa (que consome ATP). Já a fotossíntese oxigênica é capaz de gerar poder redutor, uma vez que o aceptor final de elétrons consiste em uma $NAPD^+$ redutase. Além disso, para esse sistema não se poderia pensar em um melhor doador de elétrons: a água – elemento extremamente abundante na superfície de nosso planeta, muito mais do que os locais onde compostos químicos reduzidos se encontram disponíveis. Além disso, não existe vida (na forma ativa) em locais em que não exista água. Logo, para a vida ela está sempre presente.

Isso implica que, uma vez originada, organismos capazes de realizar fotossíntese oxigênica (primeiras cianobactérias) rapidamente se espalharam, por causa da grande vantagem adaptativa de seu metabolismo. Tamanha foi a vantagem evolutiva proveniente da fotossíntese oxigênica que nosso planeta passou por um grande evento de oxigenação da crosta terrestre e aumento dos níveis de oxigênio da atmosfera. No entanto, o oxigênio é tóxico para a grande maioria dos organismos anaeróbios (e mesmo aeróbios, em algum grau), o que reduziu ainda mais a abundância destes na superfície terrestre, inclusive os organismos que realizavam fotossíntese anoxigênica, limitando-os a ambientes restritos.

Metabolismo energético dependente de radiólise

Até então foram apresentados diferentes metabolismos energéticos, tanto para a obtenção de ATP como para a geração de poder redutor e para a fixação de CO_2. Tais metabolismos diferem consideravelmente daquilo que podemos considerar convencional. Porém, apesar de distintos, todos os metabolismos e organismos apresentados anteriormente estão inseridos

em ecossistemas que são dependentes, em última instância, de energia solar ou energia química (sendo produtores primários ou não).

Essa noção de que os ecossistemas seriam dependentes de energia solar ou química só mudou entre 2006 e 2008, com o primeiro relato de um ecossistema dependente da energia proveniente da radiólise (Lin et al., 2006; Chivian et al., 2008). Curiosamente, também foi o primeiro relato de um ecossistema dependente de um organismo só, batizado de *Candidatus Desulforudis audaxviator* (Chivian et al., 2008). O organismo foi encontrado em uma mina de ouro localizada na África do Sul, a 2,8 km de profundidade.

Pelo sequenciamento do genoma do organismo, pôde-se observar que é extremamente versátil em termos metabólicos. Sendo um ecossistema de um organismo só, era de se esperar que fosse capaz de sintetizar todos os seus nutrientes necessários (aminoácidos, açúcares etc.), desde que houvesse um suprimento exógeno de energia e carbono, ambos biologicamente disponíveis.

Porém, o que torna o organismo (e o ecossistema interessante) são suas vias de obtenção de energia e poder redutor para a fixação de CO_2. A via principal de obtenção de ATP é através da redução de sulfato (descrita anteriormente), que age como aceptor final de elétrons. O doador de elétrons utilizado é o hidrogênio, que fixa o CO_2. No entanto, o sulfato é gerado no ambiente por causa do decaimento radioativo do urânio, que gera peróxido de hidrogênio (H_2O_2) e que, por sua vez, interage com a pirita (FeS_2), liberando assim íons SO_4^{2-} que podem ser utilizados na respiração celular anaeróbica. O hidrogênio (H_2) que é o doador de elétrons para a produção de ATP e também para a geração de poder redutor, é gerado pela radiólise da água promovida pelo decaimento do urânio. O esquema metabólico do organismo está apresentado na Figura 9.5.

A radiólise também tem papel importante na disponibilização de nitrogênio para o micro-organismo. Íons H^+ gerados pela radiólise do bicarbonato auxiliam a dissolução da calcita, liberando

assim um íon Ca^{2+}, que retira um íon de amônia da esmectita, disponibilizando assim nitrogênio para o micro-organismo.

Por fim, a descoberta de tal organismo (e o ecossistema que ele compõe) também é interessante pelo fato de estar situado a 2,8 km de profundidade na crosta terrestre, pois demonstra que a vida microbiana é capaz de sobreviver e, principalmente, consegue chegar a essas profundidades na crosta do planeta. Um ecossistema como esse, completamente isolado e protegido da superfície, poderia sobreviver às maiores catástrofes planetárias que podemos imaginar e ser um modelo de vida em ambientes críticos do Universo, como o fundo oceânico em Europa, lua de Júpiter.

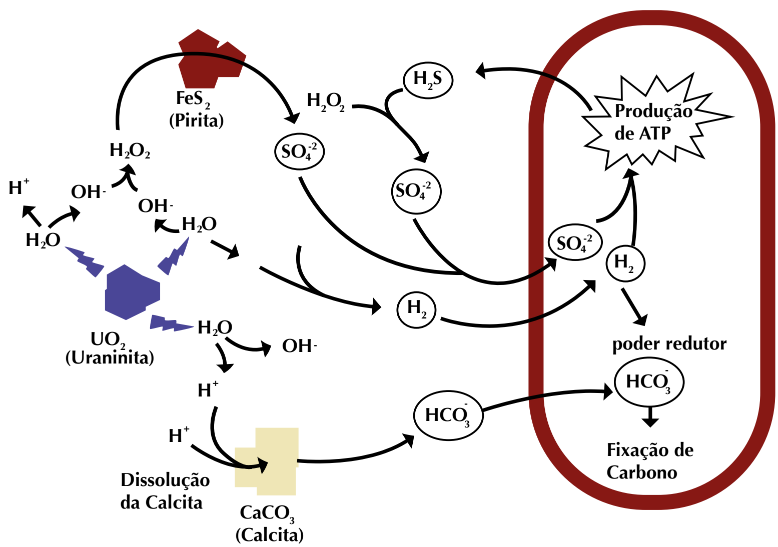


Figura 9.5. Resumo do metabolismo proposto por Chivian et al. para o *Candidatus Desulforudis audaxviator* (baseado no trabalho de Chivian et al., 2008).

Implicações para a astrobiologia

Nossa consideração de metabolismo convencional está embasada na realidade atual de nosso planeta: oxigênio abundante, organismos multicelulares aeróbios e predominância de produtores

primários que realizam fotossíntese oxigênica. Porém, ao considerarmos o contexto cósmico, a condição atual de nosso planeta não é nada convencional.

Quanto à questão energética, nosso planeta foi profundamente transformado pelo aumento das taxas de oxigênio e pelo surgimento da fotossíntese oxigênica; hoje, tudo que podemos enxergar a olho nu e é vivo tem sua energética relacionada ao oxigênio, e isso torna nosso planeta não convencional: não existe, por exemplo, nenhuma evidência de que exista oxigênio gasoso em concentrações significativas em outro corpo do nosso Sistema Solar, e também não temos motivos para acreditar que esse tipo de ambiente exista. Caso seja encontrado, com certeza será uma surpresa para a comunidade científica.

Sendo assim, como podemos pensar em vida em lugares como Marte, ou então na lua gelada de Júpiter, Europa? Em Marte, a radiação na superfície é muito elevada e praticamente inviável para a vida, limitando a fotossíntese (Hassler et al., 2014). Em Europa, a grossa camada de gelo na superfície impediria a luz de entrar e iluminar o oceano líquido, que se acredita existir abaixo do gelo (Khurana et al., 1998). Também se sabe que a quantidade de oxigênio gasoso em Marte é muito baixa e não existem indícios de que ele exista em Europa. Então, como a vida poderia existir nesses corpos do nosso Sistema Solar, considerando que seriam os mais promissores para abrigar a vida como a conhecemos? Pensando na questão energética, organismos que habitassem esses ambientes deveriam ter metabolismo energético não convencional, como os descritos anteriormente. A geração de ATP, assim como a produção de poder redutor, seria baseada em compostos químicos reduzidos, que doariam elétrons para um aceptor final (que não o oxigênio), gerando assim quantidades satisfatórias de ATP capazes de fixar carbono. Portanto, a vida provavelmente seria baseada em algum tipo de metabolismo quimiolitotrófico e com respiração anaeróbia.

Mas, claro, para isso precisaríamos de uma fonte de energia química. Isso é relativamente fácil de se imaginar em Europa ou

outras luas geladas em que também se acredita existirem oceanos líquidos em contato com um leito rochoso, como Ganimedes por exemplo (McCord et al., 2001). Nesses cenários, podemos imaginar compostos químicos reduzidos originários de fontes hidrotermais no assoalho oceânico, similar ao que ocorre aqui na Terra. Em Marte, tal metabolismo dependeria de depósitos minerais preexistentes, que provavelmente não estariam sendo constantemente renovados, como no caso dos vulcões no fundo do mar (por causa da inexistência de tectonismo no planeta).

A descoberta de ecossistemas dependentes de radiólise (Lin et al., 2006; Chivian et al., 2008) expande ainda mais as possibilidades de habitabilidade em nosso Sistema Solar, uma vez que essa fonte de energia poderia estar disponível mesmo em grandes profundidades, protegida da radiação incidente no planeta e não dependeria de fontes de compostos químicos reduzidos que fossem constantemente ciclados: bastariam estar presentes condições para o decaimento radioativo. Além disso, o exemplo encontrado aqui na Terra também demonstra que certos "oásis" para a vida podem existir, pequenos e localizados. Não é difícil de se pensar, então, que virtualmente, em qualquer planeta ou lua rochosa, pode existir no subterrâneo pequenos bolsões com água líquida (talvez aquecidos o suficiente por causa da proximidade do manto, ou por forças de maré geradas por um planeta gigante vizinho) e que permitam a vida, dependente de radiólise. Aparentemente, o mesmo organismo que foi encontrado na mina de ouro na África também foi encontrado no Vale da Morte, na Califórnia, a 900 m de profundidade, apesar de o assunto ainda não ter sido retratado oficialmente em uma publicação científica. Caso se confirme, tal fenômeno poderia sugerir que um "gargalo" evolutivo tenha ocorrido e restringido tais micro-organismos para maiores profundidades, o que não deixa de ser interessante também quando consideramos planetas que já tiveram condições mais amenas e hoje possuem uma superfície com condições hostis à vida, como o planeta Marte. O mesmo gargalo evolutivo pode ter ocorrido e

forçado os micro-organismos da superfície a habitarem regiões mais profundas, ao passo que aqueles que permaneceram na superfície foram extintos.

Porém, a astrobiologia não se resume à busca de vida fora da Terra. O estudo e entendimento dos metabolismos energéticos pouco convencionais é de extrema importância para o estudo da habitabilidade de nosso planeta no passado e para a evolução da vida. Inicialmente, a vida existiu em um planeta anóxico e muito mais severo do que as condições atuais. Acredita-se que, em algum momento da evolução, os primeiros micro-organismos quimiolitotróficos "aprenderam" a fazer fotossíntese anoxigênica, o que representou uma grande vantagem evolutiva, uma vez que os doadores de elétrons poderiam ser destinados exclusivamente para a geração de poder redutor. Eventualmente, surgiu a fotossíntese oxigênica, que, por causa de sua grande eficiência energética e flexibilidade (o doador de elétrons é a água, aumentando em muito os nichos habitáveis), permitiu o rápido desenvolvimento desses organismos e alterou completamente o rumo da vida e da geologia de nosso planeta, que hoje evolui de forma sinérgica com a biosfera.

Referências

Abreu, F. et al. "Candidatus Magnetoglobus multicellularis", a multicellular, magnetotatic prokaryote from a hypersaline environment. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, v. 57, p. 1318-1322, 2007.

Bryant, D. A.; Frigaard, N. Prokaryotic photosynthesis and phototrophy illuminated. *Trends in Microbiology*, v. 14, p. 488-496, 2006.

Cardona, T.; Murray, J. W.; Rutherford, A. W. Origin and evolution of water oxidation before the last common ancestor of the cyanobacteria. *Molecular biology and evolution*, v. 32, n. 5, p. 1310-1328, 2015.

Chivian, D. et al. Environmental genomics reveals a single-species ecosystem deep within earth. *Science*, v. 322, n. 5899, p. 275-278, 2008.

COHEN, Y.; PADAN, E.; SHILO, M. Facultative anoxygenic photosynthesis in the cyanobacterium *Oscillatoria limnitica*. *Journal of Bacteriology*, v. 123, n. 3, p. 855-861, 1975.

DANOVARO, R.; DELL'ANNO, A.; PUSCEDDU, A.; GAMBI, C.; HEINER, I.; KRISTENSEN, R. M. The first metazoa living in permanently anoxic conditions. *BMC Biology*, v. 8, n. 30, 2010.

DUBIEL, M.; HSU, C. H.; CHIEN, C. C.; MANSFELD, F.; NEWMAN, D. K. Microbial iron respiration can protect steel from corrosion. *Applied and Environmental Microbiology*, v. 68, p. 1440-1445, 2002.

FRIGAARD, N.; DAHL, C. Sulfur metabolism in phototrophic sulfur bacteria. *Advances in Microbial Physiology*, v. 54, p. 103-200, 2009.

HASSLER, D. M. et al. Mars' surface radiation environment measured with the Mars science laboratory's curiosity rover. *Science*, v. 343, n. 6169, 2014.

JANNASCH, H. W.; WIRSEN, C. O. Morphological survey of microbial mats near deep-sea therman vents. *Applied and Environmental Microbiology*, v. 41, p. 528-538, 1981.

JOGENSEN, B. B.; COHEN, Y.; REVSBECH, N. P. Transition from anoxygenic to oxygenic photosynthesis in a microcoleus chthonoplastes cyanobacterial Mat. *Applied and Environmental Microbiology*, v. 51, n. 2, p. 408-417.

KHURANA, K. K. et al. Polanskey, C. Induced magnetic fields as evidence for subsurface oceans in Europa and Callisto. *Nature*, v. 395, n. 6704, p. 777-780, 1998.

KORIBANICS, N. M. et al. Spatial distribution of an Uranium-respiring betaproteobacterium at the Rifle, CO field research site. *Plos One*, v. 10, n. 4, 2015.

KULP, T. R. et al. Arsenic(III) fuels anoxygenic photosynthesis in hot spring biofilms from Mono lake, California. *Science*, v. 321, n. 5891, p. 967-970, 2008.

LIN, L. H. et al. Long-term sustainability of a high-energy, low-diversity crustal biome. *Science*, v. 314, n. 5798, p. 479-482, 2006.

MCCORD, T. B.; HANSEN, G. B.; HIBBITTS, C. A. Hydrated salt minerals on Ganymede's surface: evidence of an ocean bellow. *Science*, v. 292, n. 5521, p. 1523-1525, 2001.

MUYZER, G.; STAMS, A. J. M. The ecology and biotechnology of sulphate-reducing bacteria. *Nature reviews microbiology*, v. 6, n. 441-454, 2008.

NAKANO, M. M.; ZUBER, P. Anaerobic growth of a "strict aerobe" (*Bacillus subtilis*). *Annual review of Microbiology*, v. 52, n. 1, p. 165-190, 1998.

NEMATI, M. et al. Biological oxidation of ferrous sulphate by *Thiobacillus ferroxidans*: a review on the kinetic aspects. *Biochemical Engineering Journal*, v. 1, p. 171-190, 1998.

NORTHUP, D. E.; LAVOIE, K. H. Geomicrobiology of caves: a review. *Geomicrobiology Journal*, v. 18, p. 199-222, 2001.

PECK, H. D. Energy-coupling mechanism in chemolithotropic bacteria. *Annual Review of Microbiology*, v. 22, p. 489-518, 1968.

STOLZ, J. F.; OREMLAND, R. S. Bacterial respiration of arsenic and selenium. *FEMS Microbiology Reviews*, v. 23, n. 5, p. 615-627, 1999.

THAUER, R. K.; JUNGERMANN, K.; DECKER, K. Energy conservation in chemotrophic anaerobic bacteria. *Bacteriology Reviews*, v. 41, p. 100-180, 1977.

UNDEN, G.; BONGAERTS, J. Alternative respiratory pathways of Escherichia coli: energetics and transcriptional regulation in response to electron acceptors. *Biochimica et biophysica Acta*, v. 1320, n. 3, p. 217-234, 1997.

YANG, T. et al. Factors influencing bioleaching cooper from waste printed circuit boards by Acidithiobacillus ferroxidans. *Hydrometallurgy*, v. 97, n. 1-2, p. 29-32, 2009.

Zehr, J. O.; Oremland, R. S. Reduction of selenate to selenide by sulfate-respiring bactéria: experiments with cell suspensions and estuarine sediments. *Applied and Environmental Microbiology*, v. 53, n. 6, p. 1365-1369, 1987.

QUANDO OS ANIMAIS HERDARAM O PLANETA

Capítulo 10

Mírian Liza Alves Forancelli Pacheco, Bruno Becker Kerber
e Francisco Rony Gomes Barroso

Em 1909, o paleontólogo norte-americano Charles Doolittle Walcott descobriu um extraordinário registro fóssil preservado no Folhelho de Burgess (Colúmbia Britânica, Canadá), constituído de espetaculares preservações de enigmáticos animais, como *Anomalocaris* e *Opabinia* (Figura 10.1), nunca antes documentados.



Figura 10.1. *Anomalocaris* e *Opabinia (*seres dos mares cambrianos).Fonte: Shutterstock

O aparecimento repentino de vários fósseis de organismos complexos em rochas tão antigas (hoje datadas entre 542 e 488 milhões de anos) também havia sido notado por Charles Darwin, e, de fato, o assombrava. Essa constatação iria balançar os alicerces da Teoria da Evolução, tão meticulosamente construída, causando receio de transformar, de modo irreversível, as crenças da humanidade. Darwin devotou muito tempo de vida à coleta de dados, analisando e contemplando as características e as interações entre os mais diversos seres, nas mais remotas partes do mundo, para reunir fortes subsídios para uma teoria que ele mesmo só teria trazido ao conhecimento do público trinta anos após ter escrito *A origem das espécies*. Assim, uma vez que a evolução de Darwin explicava a transformação das espécies apenas de forma suave, contínua e gradual, ao longo do tempo geológico, o misterioso e súbito aparecimento desses complexos organismos no registro fóssil, rico em formas e interações ecológicas (por exemplo, com predadores e parasitas), tornou-se um dilema que "tirou o sono" de Darwin, suscitando as mais polêmicas discussões sobre a história e a evolução da vida no planeta. É como se essa grande variedade de formas de vida tivesse surgido do nada. Darwin não tinha como se basear em sua ideia contínua de evolução para explicar esse fato.

Em uma simples analogia temporal entre as 24 horas de um dia terrestre e o tempo geológico, desde a origem do planeta, no Pré-Cambriano (há mais ou menos 4,5 bilhões de anos) até o aparecimento abundante das primeiras formas de vida visível e complexa no registro fóssil (há cerca de 580 milhões de anos), teriam se passado aproximadamente 20 horas e mais alguns minutos até o repentino aparecimento de complexos invertebrados. Foi justamente pelo surgimento inesperado e pela inauguração de formas de vida complexa, que corresponderiam a apenas 20% do registro fóssil, que esse capítulo da história da vida na Terra foi denominado pelos paleontólogos como "Explosão Cambriana" (há aproximadamente 540 milhões de anos).

Em 1972, Niles Eldredge e Stephen Jay Gould entenderam o registro fóssil de outro modo que não o sempre gradual e propuseram

que a evolução pode ocorrer de maneira rápida e localizada. Essa explicação tornou-se uma nova teoria evolutiva, conhecida como Equilíbrio Pontuado, que finalmente justificou a explosão de vida nos mares do Cambriano e foi muito bem relatada em um dos grandes best-sellers da Paleontologia, *Vida maravilhosa*, escrito pelo próprio Gould.

Por outro lado, a Explosão Cambriana até hoje intriga paleontólogos e biólogos evolutivos, uma vez que esses cientistas ainda tentam entender se isso realmente aconteceu e, no caso de ter ocorrido, quais foram as causas que levaram à proliferação em massa de organismos complexos em um período relativamente curto de tempo, e o que esse evento acarretaria na origem e evolução dos animais. Contudo, responder a essas perguntas é uma tarefa árdua, uma vez que os fósseis dos mais antigos animais da Terra apresentam um registro incompleto, raro e demasiadamente destruído por causa de processos naturais que neles atuam desde sua morte, há mais de 500 milhões de anos. É esse ponto de vista do registro fóssil que os cientistas da vertente mais conservadora do pensamento evolutivo têm, como Richard Dawkins, que considera essa teoria, em suas próprias palavras, "uma loucura!" (em seu livro *A grande história da evolução: na trilha dos nossos ancestrais*), uma vez que já há relatos sobre a origem dos animais pelo menos 40 milhões de anos antes do registro repentino do Cambriano.

Infelizmente, Darwin morreu sem resolver seu dilema. Mas nós vamos tentar entender esse intrigante evento, mergulhando na história da Terra, rumo ao misterioso alvorecer das primeiras formas de vida animal, em suas origens mais remotas, bem como de outros estranhos seres que, ao contrário dos animais, não sobreviveram à complexidade das relações ecológicas que se estabeleceram há centenas de milhões de anos.

A evolução dos organismos no tempo geológico

O Pré-Cambriano é um longo intervalo informal do tempo geológico, que compreende todo o espaço temporal entre a origem da Terra e o início do éon seguinte, o Fanerozoico (que significa "vida

visível"), iniciado pela era Paleozoica, período Cambriano (entre 542 e 488 milhões de anos), em que a vida animal se estabeleceu de modo abundante e diverso. O Pré-Cambriano compreendeu a fase mais longa da história evolutiva da vida na Terra, que teve início há aproximadamente 4,56 bilhões de anos. Durante a maior parte do tempo geológico, a vida foi representada por micro-organismos (principalmente cianobactérias) que evoluíram de forma espantosamente lenta e permaneceram em um estágio que os biólogos hoje definem como estase evolutiva.

Por outro lado, no final do Pré-Cambriano, na era Neoproterozoica (datada entre 1 bilhão e 542 milhões de anos), dramáticas mudanças biológicas e ambientais e importantes inovações evolutivas ocorreram. Repetidas glaciações (eventos climáticos extremos de baixa temperatura e congelamento, também conhecidos como "eras do gelo") de extraordinária magnitude e grandes eventos de liberação de nutrientes nos oceanos foram relatados para esse intervalo de tempo. É provável que nesse contexto de pressões ambientais e de oferta de nutrientes tenham surgido e se diversificado vários seres unicelulares de maior complexidade que, eventualmente, evoluíram à multicelularidade, tornando-se mais abundantes ao final daquela era.

Apenas no final do último período da era Neoproterozoica, denominado "Ediacarano" (entre 630 e 542 milhões de anos), surgiu, no registro fóssil, um conjunto de organismos macroscópicos complexos que compuseram a denominada biota de Ediacara, assim denominada por ter sido originalmente encontrada nas colinas de Ediacara, Austrália. Nessa estranha biota, em seus primeiros momentos evolutivos, muitos organismos não tinham partes resistentes (duras), como conchas ou esqueletos, sendo compostos por corpos moles chamados de vendobiontes, de afinidades biológicas muito discutíveis. Esses organismos são tão enigmáticos que já foram atribuídos a precursores animais, algas, comunidades de bactérias e, recentemente, a um extinto grupo de protistas gigantes. Também são denominados "organismos acolchoados" e fractais, por serem ocos e terem a forma de colchões de ar ou lembrarem pneus (por exemplo, *Charnia*, Figura 10.2).



Figura 10.2. O vendobionte *Charnia*. Fonte: Wikimedia Commons

Na biota de Ediacara, poucos foram os registros de animais ou de outros organismos que deixaram representantes atuais. A preservação desses seres se deu por impressões nas rochas, o que tornou o estudo de suas características bastante difícil. Por conta disso, mesmo nos tempos atuais, os paleontólogos não conseguem determinar com precisão as afinidades evolutivas de muitos desses organismos, muito menos suas relações com as complexas formas de vida animal relatadas no registro Cambriano.

Os organismos da biota de Ediacara apresentam registro em pelo menos quarenta localidades no mundo, sendo quatro as mais famosas e temporalmente distintas: Lantian (China), Avalon (Inglaterra), White Sea (Rússia) e Nama (Namíbia).

Lantian (China), datada em cerca de 580 milhões de anos, trata-se do mais antigo registro de formas de vida macroscópica complexa, caracterizado, em sua maior parte, pela presença de animais de corpo mole e algas.

Os registros de Newfoundland, Canadá, e fósseis correlatos na Inglaterra, são compostos por organismos extintos de águas profundas de Avalon (datados entre 579 e 559 milhões de anos), em maior parte representados por vendobiontes rangeomorfos.

Fósseis evidenciados em White Sea, Rússia, e na localidade correlata de Flinders Ranges, ao sul da Austrália, compõem a assembleia fóssil de White Sea (entre 560 e 550 milhões de anos). Esses organismos de White Sea são encontrados preservados em rochas características de ambientes marinhos rasos. Em especial,

foi encontrada, na Rússia, a associação considerada de maior variedade taxonômica com prováveis moluscos, com indícios de maior desenvolvimento motor e nervoso (por exemplo, *Kimberella*).

Os fósseis Ediacaranos da assembleia Nama, mais conhecidos em rochas da Namíbia (550 a 541 milhões de anos), constituem o último momento ecológico da biota de Ediacara, incluindo tanto vendobiontes quanto animais portadores de carapaças, como *Cloudina* (também encontrado no Brasil) e *Namacalathus* preservados de modo tridimensional.

Poucos organismos Cambrianos foram interpretados como componentes da biota de Ediacara ou como seus descendentes. Os membros mais emblemáticos dessa biota, como rangeomorfos ("com forma de samambaia") e ernietomorfos ("com forma de colchão de ar"), por exemplo, possuem raros registros em contextos Cambrianos. Já foi aventado que o desaparecimento desses organismos "acolchoados" no registro não ocorreu ao final do Ediacarano, mas que constituiu o encerramento das condições ótimas de preservação para esses organismos. Essa biota teria, portanto, adentrado ao Cambriano, sem ter encontrado condições favoráveis a sua preservação, talvez em função das atividades de outros organismos que viriam a habitar e perturbar os sedimentos, os bioturbadores. Por outro lado, a escassez de fósseis da biota de Ediacara em excepcionalmente bem preservadas biotas Cambrianas, como o próprio Folhelho de Burgess, marca um cenário mais provável de extinção ou, ao menos, restrição ecológica. Assumindo-se o último pressuposto, a despeito da trajetória evolutiva desses organismos, houve extinção de muitos seres no limite Ediacarano/Cambriano. Mesmo assim, são nas biotas que atestam o último momento evolutivo da biota de Ediacara, como Nama, que estão as questões mais importantes e ainda não completamente respondidas da explosão de diversidade de formas de vida animal no Cambriano.

O alvorecer dos animais na Terra

Sem dúvida, um dos mais profundos eventos na evolução da vida na Terra foi a emergência das formas de vida animal. Como defendido por Dawkins, os animais apareceram muito antes da

quase instantânea explosão da vida no Cambriano, provavelmente antes dos registros mais antigos da biota de Ediacara, e mesmo antes das mais extremas mudanças climáticas ou atmosféricas no Pré-Cambriano. Essas suposições são confirmadas pelos relógios moleculares, biomarcadores de possíveis esponjas (datados entre 550 e 760 Ma), fósseis de possíveis seres relacionados às medusas e, até mesmo, prováveis embriões de animais! Estes foram encontrados na China, excepcionalmente bem preservados, recuando a origem dos modos sexuados de reprodução para 580 milhões de anos.

Sim, é muito provável que os animais existissem à sombra de outras formas de vida, como os vendobiontes e, por motivos relacionados a grandes mudanças globais ou a relações ecológicas de predação não praticadas pelos vendobiontes, os animais os ultrapassaram em abundância e complexidade ecológica, em um evento muito parecido ao que retirou os mamíferos da sombra dos dinossauros no final do Cretáceo. Que os animais se originaram bem antes de seu registro fóssil, os paleontólogos já o sabem, mas o que torna a "explosão de vida" no Cambriano um verdadeiro enigma são as causas que retiraram os animais da sombra de outros seres e favoreceram o estabelecimento dos ecossistemas dominados por eles, refletindo um salto evolutivo que mais lembra uma explosão.

Mesmo com evidências de vida animal antes de 600 Ma, nesse intervalo de tempo os oceanos eram pobres em oxigênio e, portanto, inadequados para a diversificação animal. Mas, mesmo em um contexto generalizado de falta de oxigênio nos oceanos, é possível que a versatilidade metabólica dos primeiros estágios de evolução animal possa ter sido um fator-chave na emergência e no estabelecimento do grupo, enquanto o posterior evento de oxigenação viabilizou complexidade, mobilidade e aumento do tamanho desses seres.

O rompimento do primeiro grande continente, Rodínia e sua máxima dispersão (entre 750 e 700 milhões de anos), resultou na formação de diferentes ambientes (rasos, costeiros e ricos em nutrientes) que podem estar diretamente relacionados à diversificação biológica.

Por outro lado, as glaciações desse tempo também podem ter constituído uma pressão que viabilizou a evolução das formas mais diversificadas de vida animal. É mais provável que, no intervalo glacial entre cerca de 720 e 635 milhões de anos, as primeiras linhagens de animais divergiram de seus ancestrais unicelulares, provavelmente em íntima proximidade com ambientes marinhos congelados, pobres em oxigênio e ricos em ferro.

Enquanto no Ediacarano as comunidades biológicas passaram a ser dominadas por macrorganismos (vendobiontes e xenofióforos), provavelmente devido à ausência de macro predação, os animais surgiram e permaneceram à sombra desses organismos até que uma revolução ecológica causou inovações nas populações, que podem ter levado à extinção dos vendobiontes e ao estabelecimento dos ecossistemas dominados por animais no limite Ediacarano/Cambriano.

É muito provável que episódios biológicos entre os animais, como o surgimento de partes duras (esqueletos e conchas), tenha sido impulsionado por eventos de predação, como forma de proteção em um contexto de grandes mudanças nas condições ambientais, por exemplo a ruptura dos supercontinentes, a elevação do nível dos oceanos, as flutuações nos teores de oxigênio da atmosfera, as mudanças na química dos oceanos e os grandes eventos de glaciação.

O limite Ediacarano/Cambriano foi marcado por pronunciada falta de oxigênio em mares profundos. Em seguida, o registro fóssil do Cambriano apresenta maior diversidade de marcas verticais de atividades de animais, que denominamos de “infauna”, e, quando preservadas no registro, os paleontólogos definem como icnofósseis. Esses icnofósseis mostram que os organismos começaram a utilizar os sedimentos para proteção e/ou atividades de alimentação e refletem um período de reestruturação ecológica que se estabeleceu no Cambriano, conhecido como “Revolução Agronômica”. Antes dessa revolução ecológica, os estranhos seres que dominavam a biota de Ediacara viviam fixos ao substrato, alimentando-se por filtração, enquanto os poucos seres providos de motilidade, como o animal *Kimberella*, apenas pastavam sobre esteiras microbianas.

Considerando que a produção de partes duras e as atividades na infauna sejam estratégias também atribuídas à pressão de predação, e uma vez que animais com partes duras e a infauna surgiram quase ao mesmo tempo no registro, há um forte argumento de que a predação também tenha se revelado um fator ativo na reestruturação dos ecossistemas, favorecendo seu domínio pelos animais.

Assim, a complexidade da ecologia não aumentou significativamente apenas devido ao aparecimento das primeiras formas de vida animal, mas também por causa das intrínsecas mudanças que eles causaram no ambiente e à coevolução predador/presa, refletida na aquisição independente de esqueletos nos animais e exploração de novos habitats, culminando na explosão cambriana (Figura 10.3).

Diante do estabelecimento de ecossistemas ecologicamente mais favoráveis aos animais, no contexto das mudanças provocadas pela "Revolução Agronômica", é muito provável que os vendobiontes e os demais seres estranhos do Ediacarano tenham sido extintos a priori por condições ambientais desfavoráveis e também por predação e/ou competição.

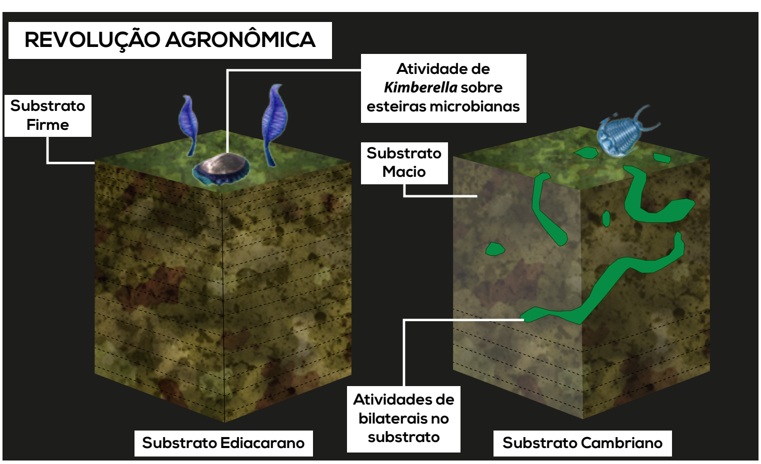


Figura 10.3. Revolução Agronômica. Notar as diferenças entre os substratos Ediacarano e Cambriano. Fonte: Adaptado de http://www.burgess-shale.rom.on.ca / Ilustração: Maurício Marcelo / Tikinet

Momentos antes da explosão Cambriana no Brasil

Bacia de Itajaí

Um dos mais importantes registros paleontológicos brasileiros, no contexto da evolução das primeiras formas de vida macroscópicas e complexas, é a Bacia de Itajaí, em Santa Catarina. Datada de cerca de 595-558 Ma, as rochas dessa unidade geológica contêm fósseis e traços fósseis (icnofósseis) que podem pertencer às primeiras comunidades bentônicas do período Ediacarano (Figura 10.4). Os icnofósseis dessa unidade podem estar entre os primeiros registros de atividade de animais bilatérios, trazendo novas implicações na origem desses organismos e suas influências nas transformações do substrato, que culminaram na "Revolução Agronômica" da transição Ediacarano/Cambriano. Além disso, a Bacia de Itajaí pode representar um dos poucos casos conhecidos no Brasil onde se encontra a presença da biota de corpo mole típica do Ediacarano, comumente conhecida pelos vendobiontes.

Além desses fósseis, algumas estruturas enigmáticas já atribuídas a impressões de esponjas, interpretadas como semelhantes ao gênero Cambriano *Choia* (Figura 10.4 A), se confirmadas, podem representar um dos poucos registros desse grupo já no Ediacarano.

Recentemente, pesquisadores têm apontado o papel de esponjas na modificação do ambiente e criação de condições benéficas para outros organismos em ecossistemas marinhos. Essa ideia está dentro do conceito da Engenharia de Ecossistemas, que é quando um grupo de organismos, por meio de suas atividades, transformam habitats, podendo ter importantes impactos na biota e, indiretamente, no próprio ambiente. No caso das esponjas, estas podem ter influenciado nos padrões de ventilação e remoção de matéria orgânica nas águas oceânicas do Ediacarano. Sendo assim, estudos paleontológicos na Bacia de Itajaí podem trazer implicações importantes no estabelecimento dos primeiros organismos bentônicos e na possibilidade da presença de esponjas como engenheiros de ecossistemas.

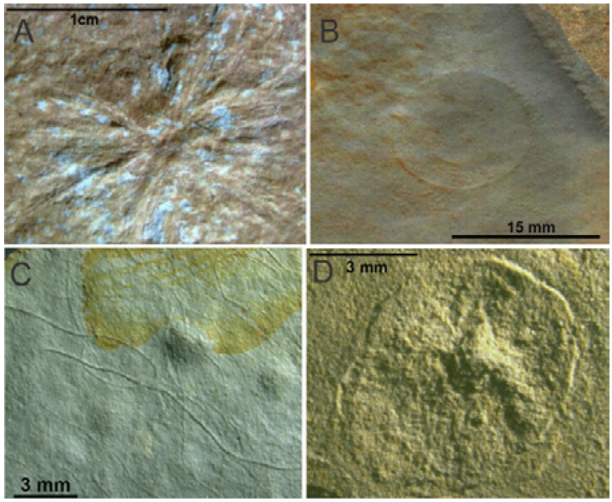


Figura 10.4. Fósseis evidenciados na Bacia de Itajaí. (A) *Choia*?; (B) *Cyclomedusa*?; (C) *Helminthoidichnites*; (D) *Aspidella*?. Fonte: Adaptado de Rosa, A. L. Z. (2005)

Bacia Jaibaras

Talvez a mais recente descoberta de organismos de corpo mole atribuídos à biota de Ediacara brasileira encontre-se nos municípios de Pacujá e Santana do Acaraú (noroeste do Ceará). Essa área é caracterizada por unidades litológicas muito antigas que abrangem do Pré-Cambriano ao início do Paleozoico.

Ao que tudo indica, esses fósseis foram preservados na Bacia de Jaibaras, em uma área com cerca de 100 km de afloramentos descontínuos, formando uma abundante comunidade bentônica que viveu provavelmente há cerca de 550 Ma. Toda essa comunidade está preservada sob condições ambientais semelhantes de alta energia, possivelmente um estuário, que é um “braço” do mar formado pela desembocadura de um rio. O alto fluxo de detritos carregados por esse rio em direção ao mar pode ter ocasionado a mortandade em massa desses organismos por meio de um rápido soterramento, uma vez que os espécimes são encontrados ainda em posição de vida.

Contudo, esses fósseis estão preservados em moldes formados por grãos muito grossos de areia e cascalho (Figura 10.5),

o que torna complicada a descrição e a interpretação sobre vários aspectos dessa extinta biota. Há uma grande discussão na literatura sobre fósseis de organismos bentônicos Ediacaranos semelhantes aos encontrados em Jaibaras, especialmente as formas discoides, sendo sugeridas diferentes origens biogênicas e mesmo abiogênicas.

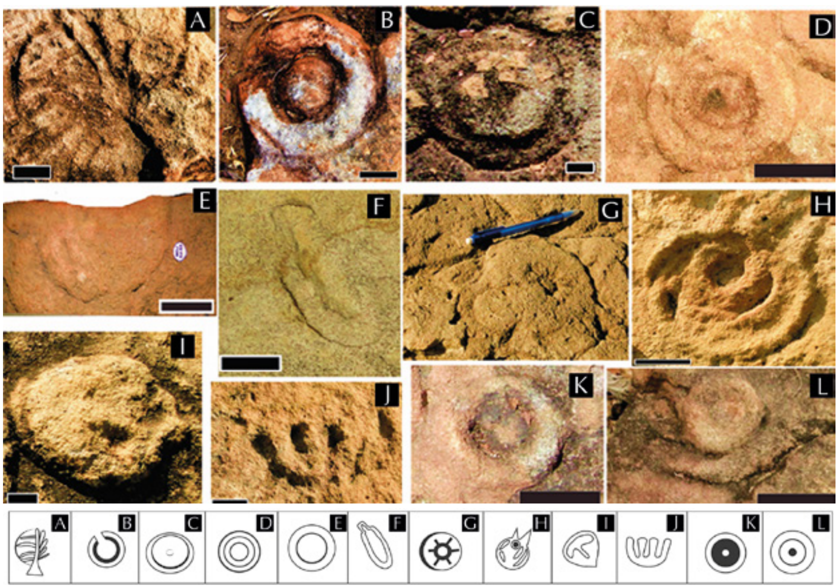


Figura 10.5. Fósseis de Pacujá: (A) *C. arboreus* (escala 3 cm); (B) *C. concentricus* (escala 4 cm); (C) *C. davidi* (escala 1 cm); (D) *C. delicata* (escala 7 cm); (E) *E. flindersi* (escala 5 cm); (F) *K. quadrata* (escala 2 cm); (G) *M. asteroides* (escala 15 cm); (H) *P. reticulata* (escala 5 cm); (I) *P. minchami* (escala 1 cm). (J) *P. abyssalis* (escala 3 cm); (K) *S. wadea* (escala 2 cm); (L) *T. disciformis* (escala 3 cm). Abaixo, temos a representação esquemática dos mesmos fósseis na respectiva ordem. Fonte: Adaptado de Barroso et al. (2013, 2014)

Essas polêmicas existem desde a descoberta do primeiro fóssil discoide Ediacarano *Aspidella terranovica* até sua aceitação como estrutura biogênica, que durou cerca de 150 anos, em virtude de sua morfologia relativamente simples e de preservação não muito fiel. Atualmente, aceita-se que *Aspidella* é apenas a parte basal, que ficava enterrada no substrato, servindo

para fixação daquelas frondes típicas da biota de Ediacara (vendobiontes?).

Não apenas na biota de Ediacara, mas na famosa fauna de Burgess, no Cambriano, a descrição de fósseis morfologicamente simples atribuídos às medusas foi revisada quando descobriram um espécime completo de *Anomalocaris*, e reconheceram que o aparelho bucal havia sido descrito como medusa por ter sido preservado separadamente.

Desse modo, estudos sobre o processo de fossilização desses organismos, o que denominamos de "Tafonomia", poderão solucionar algumas questões a respeito dessa biota fóssil, como as relações ecológicas, a disposição ambiental desses organismos e até mesmo questões sistemáticas.

Descrever os fósseis de corpo mole da biota de Ediacara nunca foi tarefa fácil para os paleontólogos. De modo geral, as interpretações mudaram muito ao longo do tempo e vários organismos que inicialmente foram descritos como cnidários passaram a ser considerados componentes de outras classes, reinos e/ou subfilos (por exemplo, *Charnia* e *Hiemalora*). Esses avanços na interpretação foram conquistados a partir dos relatos de novas ocorrências da biota de Ediacara no planeta, o que aumentou significativamente o número de amostras para estudos comparativos e descritivos, resultando em dados sobre evolução, ecologia e ambientes desses organismos. Sendo assim, a biota da bacia de Jaibaras poderá compor a síntese de conhecimento mundial a respeito da evolução dos animais no planeta.

Grupo Corumbá

Sob um calor escaldante de 41 graus, em minas de calcário localizadas em Corumbá e Ladário, cidades que encantam por sua exuberância, cientistas brasileiros e alemães descreveram, na década de 1980, um dos animais que viveu, em nossa analogia entre o dia terrestre e o tempo geológico, alguns "segundos" antes da "explosão" Cambriana. *Corumbella werneri*, datada em cerca de 543 milhões de anos, foi um dos

animais que compôs o último momento evolutivo da biota de Ediacara, assim como os fósseis de Nama, no limite Ediacarano/Cambriano, quando os animais estavam saindo da sombra de outros seres e florescendo em suas mais diversas formas e interações ecológicas.

Em muitos aspectos, como a excelente preservação de partes de alguns fósseis e os processos geológicos que levaram à formação desse excepcional registro de vida, o Grupo Corumbá (Formação Tamengo) – unidade geológica onde *Corumbella werneri* é encontrada – pode ser comparado a *Burgess Shale*. Por outro lado, uma vez que os fósseis do limite Ediacarano/Cambriano compõem um registro raro e muito fragmentado, a análise e reconstituição, tanto dos organismos como dos seus modos de vida, não são tarefas fáceis para os paleontólogos. Assim, há mais de 30 anos, os cientistas de outras partes do mundo vêm desenvolvendo e aplicando técnicas avançadas e não destrutivas ao estudo dos fósseis mais antigos. Nesse cenário destacam-se, inclusive, os pesquisadores que tentam entender tanto a origem e a evolução da vida na Terra (os paleobiólogos e biólogos evolutivos), como também o estabelecimento da vida nos mais remotos ambientes, até mesmo fora do planeta (os astrobiólogos). Desse modo, a paleontologia e a astrobiologia começaram a estreitar suas relações, tanto na investigação da origem e evolução da vida na Terra quanto na busca pela vida no Cosmos.

Paleontólogos e demais cientistas brasileiros e de diversas partes do mundo têm impulsionado o uso de técnicas analíticas de alta resolução para comparações entre o contexto paleontológico dos fósseis de *Corumbella* brasileiros e os de unidades geológicas similares no Irã, na Namíbia, na Inglaterra e no Canadá. Com essas técnicas será possível, por exemplo, reconstituir importantes aspectos tanto sobre a composição química, quanto a respeito dos níveis de oxigenação da água e eventos de vulcanismo do ambiente onde esses animais se estabeleceram e evoluíram.

A composição química da carapaça de *Corumbella* e de outros fósseis a ela contemporâneos, como *Cloudina*

(preservados como conchas cônicas carbonáticas na Formação Tamengo e em várias outras partes do mundo), têm se tornado tema central nas discussões sobre os processos biológicos e/ou ambientais que levaram à síntese de esqueletos mais resistentes entre os animais no remoto limite Ediacarano/Cambriano. Talvez, inclusive por conta do aumento na abundância dos animais capazes de produzir esqueletos mais resistentes (até mesmo mineralizados), essas formas de vida tenham tido uma preservação mais favorecida no registro, nesse limite de tempo, dando a impressão de se tratar de uma explosão de vida. Para a investigação da composição química das carapaças de *Corumbella*, por exemplo, são usadas as mais avançadas técnicas em conjunto com o Laboratório Nacional de Luz Síncrotron, no Brasil (CNPEM/LNLS, Campinas), com o Instituto de Química e com o Laboratório de Astrobiologia da USP.

Além disso, pesquisadores da UFSCar, Unesp e USP, com o apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Fapesp), em conjunto com a Universidade Técnica de Munique, têm aplicado as mais complexas e avançadas técnicas de microtomografia de raios X para a reconstituição tridimensional das partes internas da fascinante *Corumbella*, nas instalações do European Synchrotron Radiation Facility (ESRF, Grenoble, França) e do Deutsches Elektronen Synchrotron (DESY, Hamburgo, Alemanha). A reconstituição de estruturas anatômicas desse animal pode fornecer importantes dados a respeito da ecologia desses organismos, como modos de alimentação e mesmo reprodução, o que, de certa forma, permite que vejamos esse animal tão antigo voltando à vida na tela do computador.

Até o momento, podemos seguramente afirmar que *Corumbella* foi um animal pertencente ao grupo dos cnidários, que viviam fixos ao substrato. Em nossa recente reconstituição de *Corumbella*, descobrimos mais uma característica que os aproxima ainda mais dos animais do final do Ediacarano: eles são portadores de uma carapaça relativamente espessa e resistente, além de abertura oral,

inovações que o tornavam um dos mais fantásticos predadores dos mares Ediacaranos (Figura 10.6).

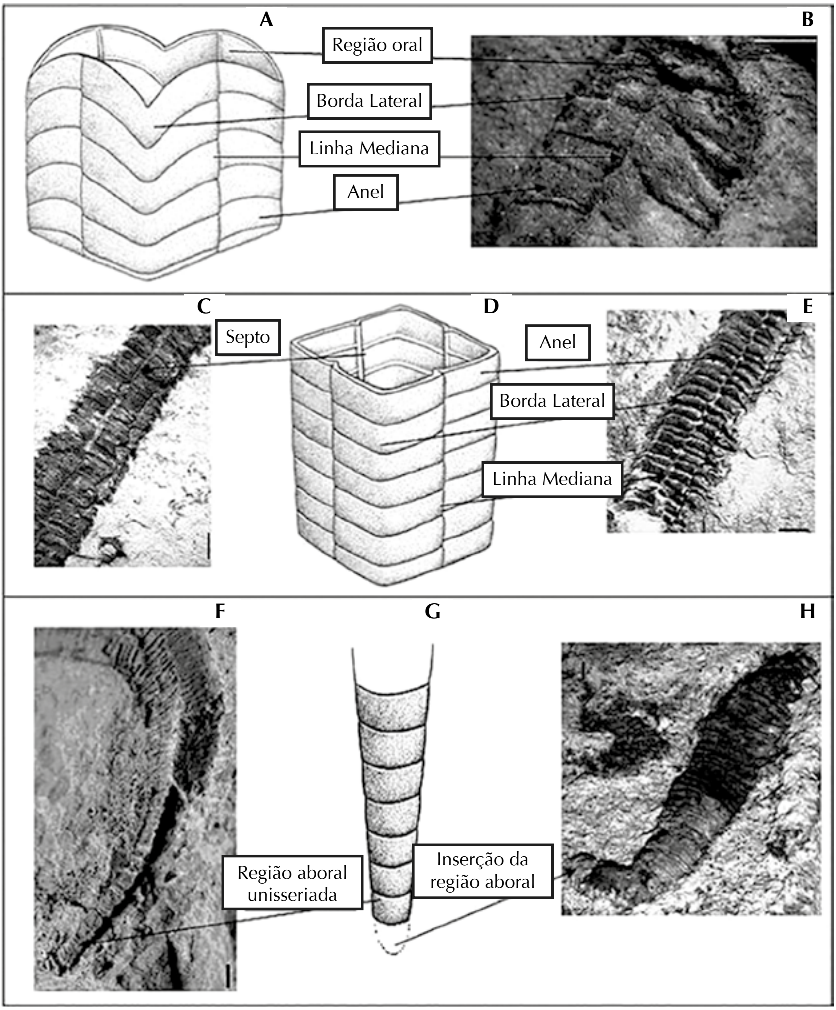


Figura 10.6. Reconstituição de estruturas morfológicas em *Corumbella werneri*. Fonte: Pacheco et al., *Journal of Taphonomy* (2011)

Além da relevância científica de *Corumbella* para a paleontologia mundial, a ocorrência desse enigmático fóssil Ediacarano, na região de Corumbá, apresenta implicações para o desenvolvimento de estratégias de geoturismo no Brasil. A presença de tão

importante e remoto fóssil, em um cenário de choque de extremos temporais, revelado pela presença do recente domínio biogeográfico do Pantanal (formado ainda na nossa atual Era Cenozoica) e das mais pregressas formações geológicas Pré-Cambrianas, em Mato Grosso do Sul, podem viabilizar que o então Geoparque Bodoquena/Pantanal venha a se tornar o segundo das Américas (atrás apenas de outro geoparque brasileiro, o Geoparque do Araripe, no Ceará) e o 58° na Cadeia Mundial de Geoparques aprovada pela Unesco.

O uso das técnicas avançadas têm aprimorado os estudos sobre morfologia, paleoecologia e evolução dos fósseis ediacaranos no Brasil, trazendo nova luz, não apenas sobre os "últimos segundos" antes da explosão Cambriana no mundo, como também estruturando subsídios para a investigação sobre as condições ótimas para o estabelecimento da vida multicelular tanto na Terra quanto em outros contextos cósmicos. Além disso, com as recentes missões exploratórias de Marte e de outros planetas do Sistema Solar, poderemos utilizar as mesmas técnicas que desenvolvemos para estudar os fósseis de nosso planeta para revelar a presença de vida passada nesses ambientes. Mas se temos dificuldade para interpretar os sinais de vida antiga na própria Terra, como seremos capazes de fazer o mesmo em outro planeta, com maiores restrições técnicas e de maneira robótica? Esse é um problema que paleobiólogos e astrobiólogos devem tentar resolver juntos, o que poderá responder se já houve vida fora da Terra.

Agradecimentos

À Fapesp e ao CNPq, pelo apoio financeiro para o desenvolvimento deste trabalho. Aos profs. drs. Juliana Leme e Thomas Fairchild (Instituto de Geociências, USP), por terem viabilizado e incentivado o estudo paleontológico dos animais fósseis de Corumbá e Ladário. Ao prof. dr. Paulo Paim (Unisinos) e Ana Zucatti (Petrobrás), pelo auxílio nas questões geológicas e paleontológicas na Bacia do Itajaí. Às profas. dras. Maria Somália Viana

(Universidade Estadual Vale do Acaraú) e Sônia Agostinho (UFPE), por viabilizarem os estudos dos fósseis da Bacia de Jaibaras. Ao dr. Douglas Galante (Laboratório de Astrobiologia, USP) pela revisão e pelo enriquecimento do texto.

Referências

Barroso, F. R. G. et al. First Ediacaran Fauna Occurrence in Northeastern Brazil (Jaibaras Basin, Ediacaran-Cambrian): Preliminary Results and Regional Correlation. *Anais*... Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências (Impresso). 2014. v. 86, p. 1029-1042.

Barroso, F. R. G. et al. New discoidal fossils of Ediacaran fauna in Jaibaras Basin (Northeastern Brazil). In: Corumbá Meeting: The Neoproterozoic Paraguay Belt (Brazil): glaciation, iron-manganese formation and biota. *Anais Corumbá*, 2013.

Brasier, M. D. *Darwin's lost world*. Londres: Oxford University Press, 2009.

Dawkins, R. *A grande história da evolução*: na trilha dos nossos ancestrais. São Paulo: Companhia das Letras, 2009.

Dzik, J. The Verdun Syndrome: Simultaneous origin of protective armour and infaunal shelters at the Precambrian-Cambrian transition. In: Vickers-Rich, P.; Komarower, P. (Eds.). *The rise and fall of the Ediacaran Biota*. Londres: Geological Society of London, 2007. p. 405-414.

Fairchild, T. R. et al. Evolution of Precambrian life in the Brazilian Geological Record. *International Journal of Astrobiology,* Nova York, v. 11, n. 4, p. 309-323, 2012.

Fedonkin, M. A. The origin of the Metazoa in the light of the Proterozoic fossil record. *Palaeontological Research*, Tokyo, v. 7, p. 9-41, 2003.

Gould, S. J. *Wonderful life: the Burgess Shale and the nature of history*. New York: W. W. Norton, 1989.

Hahn, G. et al. Kfrperlich erhaltene Scyphozoen-Reste aus dem Jungprekambrium Brasiliens. *Geologica et Palaeontologica*, Marburgo, v. 16, p. 1-18, 1982.

Hoffman, P. F.; Schrag, D. P. The snowball Earth hypothesis: testing the limits of global change. *Terra Nova*, Malden, v. 14, p. 129-155, 2002.

Narbonne, G. M. The Ediacaran biota: Neoproterozoic origin of animals and their ecosystems. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, Palo Alto, 33, p. 421-442, 2005.

Pacheco, M. L. A. F.; Leme, J. M.; Machado, A. F. Taphonomic analysis and geometric modelling for the reconstitution of the Ediacaran metazoan *Corumbella werneri* (Hahn et al., 1982) (Tamengo Formation, Corumbá Basin, Brazil). *Journal of Taphonomy*, v. 9, n. 4, p. 269-283, 2011.

Pacheco, M. L. A. F. et al. Insights into the skeletonization, lifestyle, and affinity of the unusual Ediacaran fossil Corumbella. *PLoS ONE*, San Francisco, v. 10, n. 3, 2015. e0114219. doi: 10.1371/journal.pone.0114219.

Papineau, D. Global biogeochemical changes at both ends of the Proterozoic: insights from phosphorites. *Astrobiology*, New Rochelle, v. 2, p. 165-181, 2010.

Rosa, A. L. Z. *Evidências de vida no Ediacarano Inferior da Bacia de Itajaí*. Rio Grande do Sul, 2005. Dissertação - Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade do Vale do Rio dos Sinos.

Seilacher, A. The nature of vendobionts. In: Vickers-Rich, P.; Komarower, P. (Eds.). *The rise and fall of the Ediacaran Biota*. Londres: Geological Society of London, v. 286, p. 387-397, 2007.

Seilacher, A.; Grazhdankin, D.; Legouta, A. Ediacaran biota: the dawn of animal life in the shadow of giant protists. *Paleontological Research*, Washington, v. 7, n. 1, p. 43-54, 2003.

Xiao, S.; Laflamme, M. On the eve of animal radiation: phylogeny, ecology and evolution of the Ediacara biota. *Trends in Ecology & Evolution*, Amsterdam, v. 24, p. 31-40, 2008.

Xiao, S.; Zhang, Y.; Knoll, A. H. Three-dimensional preservation of algae and animal embryos in a Neoproterozoic phosphorite. *Nature*, Londres, v. 391, p. 553-558, 1998.

Yuan, X. An early ediacaran assemblage of macroscopic and morphologically differentiated eukaryotes. *Nature*, Londres, v. 470, p. 390-393, 2011.

BUSCA DE VIDA FORA DA TERRA

Estudando o Sistema Solar

Capítulo 11

Fabio Rodrigues e Evandro Pereira da Silva

Breve histórico: estamos sós no Universo?

O questionamento sobre a existência de vida fora da Terra é um tema comum na história da humanidade, permeando tanto as culturas ocidentais quanto as orientais há muitos séculos. Na Grécia Antiga, por exemplo, diversos pensadores discutiram o tema, aplicando diferentes correntes filosóficas.

Os primeiros registros de discussões filosóficas sobre esse assunto tratam da pluralidade dos mundos, que opôs os chamados pluralistas aos singularistas. Os pluralistas acreditavam que a Terra não era um planeta especial e que poderia haver outras Terras, algumas das quais possíveis de abrigar vida. Alguns pensadores que representam essa visão foram os atomistas, como Epicuro, Demócrito (considerado o pai da teoria atômica) e seus seguidores. Para os atomistas, o Universo possuía infinitos átomos, capazes de formar infinitos planetas, alguns com vida e outros

não. Outro exemplo foi Zenão, que acreditava na pluralidade dos mundos não apenas no espaço infinito do Universo, mas também no tempo. Em contraposição aos pluralistas, os singularistas acreditavam que a Terra era única e que apenas aqui poderia haver vida. Alguns de seus representantes foram Platão e Aristóteles com fundamentações distintas (Dick, 1982).

Essa discussão perdurou por séculos até o tempo moderno, movimentando proeminentes cientistas, filósofos, escritores e teólogos. De fato, pelas implicações religiosas do tema, diversos teólogos e pensadores de diferentes religiões trataram do assunto. Alguns, como Santo Alberto Magno e São Tomás de Aquino, colocaram-se contra a pluralidade dos mundos e a existência de vida extraterrestre, enquanto outros, como Nicolau de Cusa, discutiram a existência de vida no Sol e na Lua. Muitos desses pensadores se dedicaram também a conciliar os princípios centrais do Cristianismo com a existência de vida extraterrestre. Até os dias atuais, diversas religiões, seitas e escolas filosóficas abordam o tema em suas doutrinas (Crowe, 1997).

Com o passar do tempo e com as diversas discussões acerca do assunto, observou-se o enraizamento desse tema em toda a população e, mais do que apenas uma indagação científica, esse tema tornou-se um fenômeno cultural e social.

Há quem afirme, por exemplo, que a busca por evidências científicas de vida fora da Terra, mais especificamente na Lua, foi um dos fatores que mais motivou William Herschel (1738-1822), pai da astronomia moderna, a desenvolver, entre os séculos XVIII e XIX, seus modernos telescópios. Com suas observações, Herschel definiu o conceito de galáxia, que abrigava estrelas e planetas, observou que havia outras além da Via Láctea e fez o primeiro desenho desta, mostrando que o Sol não estava em seu centro (Crowe, 1997) (Figura 11.1).

A busca de vida fora da Terra mobilizou outros grandes astrônomos de diferentes épocas, como o holandês Christiaan Huygens (1629-1695) que observou os anéis de Saturno e sua lua Titã; Percival Lowell (1855-1916), célebre por seus estudos do Planeta X,

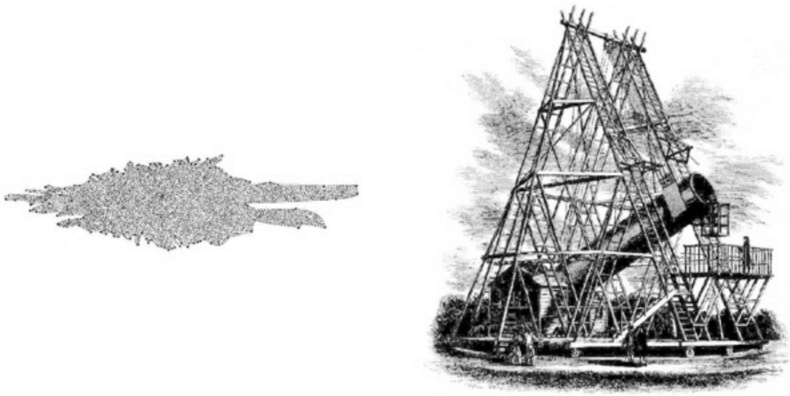


Figura 11.1. Mapa da Via Láctea desenhado por Herschel e esquema do telescópio construído por ele. Fonte: Wikimedia Commons

posteriormente rebatizado de Plutão; e Giovanni Schiaparelli (1835-1910), o primeiro a fazer um mapa completo da superfície de Marte, em que observou uma estrutura na forma de canais, interpretado por muitos como canais de irrigação artificiais que levavam água dos polos ao equador e, portanto, seriam um indicativo de vida inteligente nesse planeta (Figura 11.2).

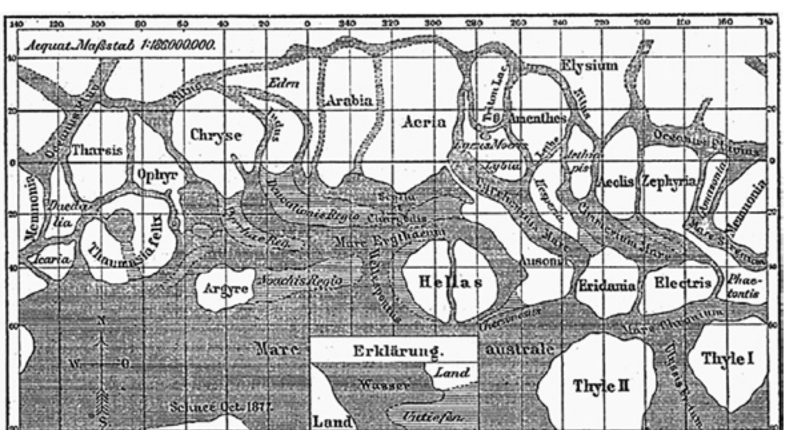


Figura 11.2. Desenhos do caderno de Schiaparelli sobre suas observações na superfície de Marte que levaram à interpretação de que seriam canais de irrigação. Fonte: Wikimedia Commons

Essa controvérsia, iniciada em 1877, foi alvo de constantes estudos de astrônomos como Lowell e durou até 1915, quando o também astrônomo italiano Vicenzo Cerulli (1859-1927) concluiu que se tratavam de formações geológicas naturais. A comunidade científica pareceu convencida da explicação, mas na cultura popular, Marte tomou lugar da Lua como principal alvo de especulação para a existência de vida. As especulações não giraram em torno apenas de vida microbiana, mas de vida inteligente e civilização.

Percebe-se que as primeiras conjecturas sobre outros mundos e seus habitantes eram puramente filosóficas, tendo sido enriquecidas por dados de observações astronômicas, conforme a tecnologia avançava e os novos instrumentos permitiam melhores condições. Pela maior facilidade de observação e pela proximidade com a Terra, durante todos esses séculos, os corpos do Sistema Solar foram os alvos mais frequentes de especulações e estudos. Apenas recentemente, com o avanço da tecnologia espacial e com a nova geração de telescópios, começa a ser possível o estudo de planetas mais distantes, os chamados "exoplanetas", que serão tratados como um tema à parte.

A partir do século XX, os avanços da astronomia permitiram melhor conhecimento de outros corpos do Sistema Solar, enquanto a crescente microbiologia ajudava a demarcar os limites da vida em nosso planeta e ajudava a estabelecer quais planetas do nosso Sistema Solar teriam condições de comportar a vida.

Curiosidade

Em 17 de dezembro de 1900, foi anunciado pela Academia Francesa de Ciências (*Académie des Sciences*) o Prêmio Guzman, financiado por Anne Emilie Clara Gouget Guzman. Esse prêmio, no valor de 100 mil francos, seria dado à primeira pessoa, de qualquer nacionalidade, que conseguisse estabelecer comunicação com habitantes de outros planetas.

O prêmio, entretanto, previa uma exceção: foi excluída da premiação a comunicação com Marte, considerada à época um feito muito fácil para merecer o prêmio, uma vez que acreditavam ser óbvia a existência de vida nesse planeta.

Mais de 100 anos depois, ainda não encontramos nenhum sinal de vida, presente ou passada, em Marte.

A corrida espacial e a busca de vida fora da terra

Se até o início do século XX a busca por sinais de vida fora da Terra foi muito indireta, com o desenrolar daquele século, as perspectivas mudaram. Uma das grandes marcas do século XX foi o grande avanço tecnológico em pouco tempo, sobretudo na segunda metade, após a Segunda Guerra Mundial.

Naquele momento, o mundo encontrava-se bipolarizado e Estados Unidos e União Soviética brigavam para se consolidar como potência hegemônica. Entre os vários pontos que entraram nessa disputa, destaca-se a conquista do espaço. As duas potências iniciam, na década de 1950, o que ficou conhecido como corrida espacial.

Os primeiros passos para essa conquista já vinham sendo dados há alguns anos, com a tecnologia de propulsão movida a combustível líquido para o lançamento dos foguetes, desenvolvida desde o final do século XIX pelo russo Konstantin Tsiolkovsky, seguido, no início do século XX, pelo americano Robert Hutchings Goddard. Nos anos 1950, nomes importantes como o do alemão naturalizado americano Wernher von Braun trabalharam para tornar viável essa conquista.

A corrida espacial levou os primeiros satélites ao espaço (iniciado pelo *Sputnik I*, da URSS, em 1957, seguido pelo norte-americano *Explorer I*, em 1958), as sondas e o homem à Lua. Além disso, resultou na presença da tecnologia humana em outros planetas e luas do Sistema Solar, com missões não tripuladas a Marte, Vênus, Mercúrio, Júpiter, Saturno e sua lua Titã, asteroides e cometas, entre outros.

A Nasa foi criada em 1958, logo após o lançamento da *Sputnik I*, a vitória dos soviéticos em chegar ao espaço, com o objetivo de coordenar os esforços e prover a condição necessária para que as pesquisas sobre voos dentro e fora da atmosfera da Terra fossem realizadas.

Nos anos seguintes, a possibilidade de o homem chegar ao espaço fez a agência iniciar os estudos de medicina espacial, visando entender o efeito do ambiente extraterrestre na saúde humana. Era o início de estudos de biologia dentro das ciências espaciais.

Outra preocupação real que surgiu com a conquista do espaço foi a proteção planetária, cujo maior defensor foi o biólogo norte-americano Joshua Lederberg, prêmio Nobel de Medicina e Fisiologia, em 1957, pelos estudos de genética. Sem saber se haveria vida fora da Terra, Lederberg alertava para o risco de uma catástrofe global caso algum organismo patogênico fosse trazido à Terra. Da mesma forma, havia a preocupação de não contaminar outros corpos celestes com organismos provenientes da Terra, invalidando assim futuras missões de busca de vida extraterrestre.

Criou-se, em 1959, um comitê de ciências biológicas dentro da Nasa que concluiu que essa agência deveria se envolver com "investigações sobre o efeito de ambientes espaciais em organismos vivos, incluindo a busca por vida extraterrestre", ao invés de se dedicar apenas à medicina espacial. Surge, nesse contexto, a exobiologia (Blumberg, 2003).

Em 1969, uma controvérsia envolvendo a missão Apollo 12 fomentou mais discussão a respeito do problema de proteção planetária e contaminação cruzada. Encontrou-se na câmera da *Survivor 3*, que integrava essa missão, após sua volta da Lua, esporos da bactéria *Streptococcus mitis*, que supostamente permaneceu no equipamento por falha no processo de esterilização e teria sobrevivido à viagem e poderiam comprovar que a vida poderia de fato viajar de um planeta a outro, no processo conhecido como "Panspermia". Além de demonstrar que a preocupação com a proteção planetária era válida, esse fato abriu a possibilidade que a vida na Terra tivesse se espalhado pelo Sistema Solar, possibilitando a vida extraterrestre. A ideia mais aceita atualmente é de que aquelas bactérias não viajaram até a Lua, mas que foram fruto de contaminação na volta para a Terra, porém, de qualquer forma, serviu de alerta à comunidade científica para o problema da contaminação cruzada.

Desde então, muitos experimentos testando a sobrevivência de micro-organismos em condições que simulavam o espaço ou outros planetas foram realizados, indicando que estes seriam capazes de sobreviver em alguns desses ambientes, nunca tendo se provado que a panspermia de fato ocorreu.

Mais recentemente, em 1996, a discussão sobre panspermia e vida fora da Terra voltou a ter destaque mundial com os estudos do meteorito Allan Hills (ALH84001), encontrado na Antártica em 1984. Trata-se de um meteorito rochoso de origem marciana (Figura 11.3), em que pesquisadores observaram uma estrutura tubular com dimensões menores que um fio de cabelo, cuja morfologia se assemelhava muito a fósseis de colônias de cianobactérias encontradas na Terra. Muitos concluíram, então, terem achado prova de vida passada em Marte que teria viajado para a Terra (McKay et al., 1996). O tema ainda é controverso, mas a ideia mais aceita pela comunidade é de que se trata de uma formação puramente geológica que apenas se parece com esses fósseis. Essa opinião, entretanto, não é unânime e ainda gera debates na comunidade científica mundial.

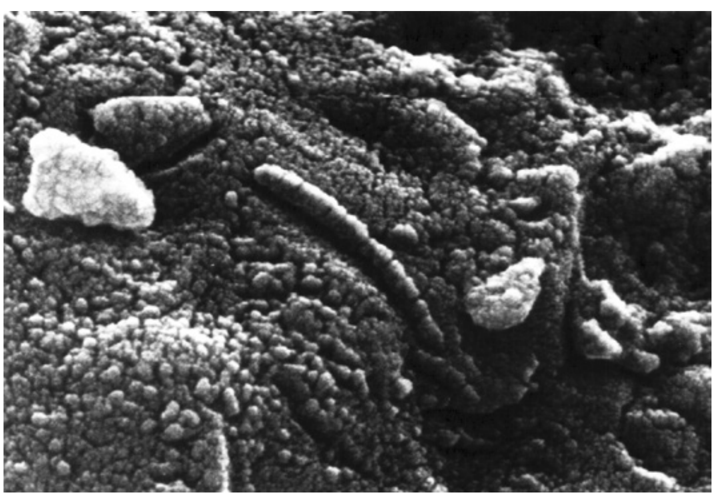


Figura 11.3. Imagem de microscopia eletrônica do meteorito Allan Hills e a formação geológica que remetia a fósseis de cianobactérias. Fonte: Nasa

Metodologia científica na busca de vida fora da Terra

Desde o surgimento da exobiologia como uma área da ciência, ela tem se distanciado da ufologia, diferindo fortemente tanto no enfoque quanto na metodologia. Missões de exploração espacial têm alto custo e devem ter objetivos bastante claros para que possam ser realizadas. Dessa forma, as pesquisas dedicadas à busca de vida extraterrestre têm que responder a três perguntas fundamentais: Onde procurar? O que procurar? Como procurar?

No planeta Terra, é possível observar formas muito distintas de vida, seja no tamanho, na aparência e nas estratégias de sobrevivência, o que garante uma diversidade de espécies muito grande. Essa vida, entretanto, é muito semelhante quando analisada em escala molecular. Todos os organismos vivos conhecidos usam como elementos básicos carbono, utilizam água como solvente, possuem uma membrana hidrofóbica que a separa do meio exterior, têm um material genético semelhante, entre outros. Ou seja, a vida como a conhecemos, apesar de bastante variada, é fundamentada em alguns princípios básicos que se repetem.

Apesar de haver cientistas que estudam formas alternativas de vida, como aquelas baseadas em outros elementos químicos (como silício ao invés do carbono) ou em outros solventes (solventes orgânicos, como formamida, ao invés de água) (Benner; Ricardo; Carrigan, 2004), não se sabe ainda se essas formas de vida poderiam existir e se conseguiríamos reconhecê-las como vivas, uma vez que seriam bastante diferentes da nossa.

Dessa forma, os programas de busca de vida fora da Terra se baseiam, pragmaticamente, na vida como é conhecida no planeta, já que sabemos que ela funciona dessa forma e também como detectá-la. Pelos conhecimentos científicos atuais, sabemos que os micro-organismos unicelulares foram os primeiros habitantes do planeta, permanecendo sozinhos por mais de 1 bilhão de anos, e até hoje representam a maior quantidade, em termos de biomassa e número, de organismos da Terra, estando presentes em praticamente todos os ambientes, de quilômetros para o interior da Terra

a dezenas de quilômetros acima, na atmosfera. Dessa forma, acredita-se que são organismos unicelulares os mais prováveis a serem encontrados fora da Terra (Des Marais et al., 2008).

Como os ambientes extraterrestres não são tão amenos para a vida como os terrestres, são de particular interesse os organismos que vivem em ambientes extremos da Terra, os chamados organismos extremófilos. Assim, os estudos de busca de vida fora da Terra usam como modelo principal os micro-organismos unicelulares extremófilos (Rothschild; Mancinelli, 2001).

Dessa forma, o conhecimento das características da vida na Terra e dos mecanismos de sobrevivência é fundamental para entender como a vida poderia sobreviver fora do nosso planeta.

Ainda não há tecnologia para missões de retorno de amostra para a Terra vindo de outros planetas ou de suas luas, de forma que não se pode tentar cultivar possíveis micro-organismos em laboratório, como se faz com amostras terrestres. Por isso, a busca é por sinais indiretos que indiquem vida, conhecidos como bioassinaturas, ou também biomarcadores (Summons et al., 2008). Bioassinatura é um sinal, o mais inequívoco possível, de atividade biológica e, em geral, consiste em moléculas que são produtos do metabolismo de organismos vivos. Podem ser gases liberados, tais como dióxido de carbono, metano ou oxigênio, ou moléculas mais complexas, como lipídios de membrana, pigmentos fotoprotetores ou o próprio material genético (Parnell et al., 2007).

Para que seja caracterizada como bioassinatura, é importante que essa molécula sobreviva às condições do ambiente e que seja indicativo claro de atividade biológica, ou seja, não pode ser sintetizado de forma abiótica. No caso de moléculas complexas, é mais fácil supor que estas não serão produzidas em quantidade significativa por rotas químicas abióticas, mas para o caso de gases emitidos na atmosfera, esse problema é mais complexo.

Fontes biológicas e não biológicas, como ciclos geológicos ou a química da atmosfera, podem produzir os mesmos gases, sendo necessário conhecer todos os ciclos que envolvem esse corpo celeste e, se não encontrar nenhuma fonte abiótica desse gás, tentar

atribuí-lo a origem biológica. Por exemplo, no início dos anos 2000, a detecção de metano em Marte levou alguns cientistas a concluir que o gás poderia sido sintetizado por micro-organismos metanogênicos (que geram metano), mas, na sequência, foram publicadas propostas para a origem abiótica desse composto, como da reação entre água e monóxido de carbono na atmosfera, ou de água e minerais no subsolo, pelo processo de serpentinização, diminuindo a expectativa sobre vida naquele planeta.

Apesar de micro-organismos serem os alvos mais importantes para se procurar vida fora da Terra, há grupos que trabalham com a possibilidade de organismos multicelulares resistirem a ambientes extraterrestres e até mesmo com probabilidade da existência de vida inteligente.

Além da vida presente, deve-se considerar a possibilidade de existência de vida passada nesses ambientes, ou seja, uma vida que já existiu, mas que, por razões ambientais, foi extinta. Assim, além da busca por seres ainda vivos, é interessante procurar sinais de vida passada (Westfall, 1999).

Uma vez sabendo os tipos de organismos que podem ser mais aptos a viverem fora da Terra, torna-se possível inferir quais corpos celestes possuem condições para abrigá-los. Esse tipo de estudo só se tornou possível com as novas tecnologias espaciais, telescópios e missões de exploração.

No Sistema Solar, o alvo mais tradicional da busca por vida extraterrestre é Marte, não só pela proximidade com a Terra e pela facilidade na observação e no envio de sondas, mas também porque se acredita que tenha tido um ambiente bastante propício para a vida no passado, e que esta possa ter persistido em alguns ambientes protegidos do planeta (como o subsolo), ou que seus resquícios, moléculas ou fósseis tenham perdurado até os dias atuais.

Atualmente, sabe-se que Marte possui atmosfera muito rarefeita (cerca de 1% da pressão da atmosfera terrestre), resultando em um intenso fluxo de radiação solar na superfície, que é formada por compostos oxidantes. Dessa forma, a superfície marciana é

considerada um local extremamente agressivo para a vida e para moléculas orgânicas em geral.

Alguns centímetros abaixo da superfície, entretanto, a radiação mais danosa à vida já não chega, tornando o ambiente mais ameno. No subsolo de Marte, já foi constatada a presença de água no estado sólido e de depósitos salinos que, por serem higroscópicos, podem reter em sua superfície a pequena quantidade de água disponível na atmosfera, formando um ambiente mais propício à vida como a conhecemos. A vida em Marte poderia, então, estar concentrada em nichos agrupados no subsolo e depósitos salinos, protegida da radiação e da superfície oxidante.

Além de Marte, outro planeta que se especula ter condições de abrigar vida é Vênus, mais próximo do Sol que a Terra e Marte. O astrônomo Carl Sagan foi um dos primeiros cientistas a propor a possibilidade de vida nesse planeta após o início da corrida espacial (Morowitz; Sagan, 1967). Por causa da sua proximidade com o Sol e do efeito estufa, já que possui grande quantidade de nuvens na atmosfera, Vênus possui uma superfície muito quente (acima de 400 °C), o que inviabilizaria a vida como a conhecemos. Sagan propôs, como alternativa, que a vida poderia estar em suas nuvens, onde a temperatura é mais baixa e a umidade maior.

Por fim, outros ambientes em que se acredita existirem condições amenas para a vida são as luas de Júpiter e de Saturno, sobretudo Europa (Júpiter), Titã (Saturno) e Encélado (Saturno). Essas luas serão discutidas com mais detalhe no capítulo 12.

De forma geral, as luas desses dois gigantes gasosos não são tão geladas como se poderia imaginar, considerando-se apenas a distância até o Sol e o fluxo de radiação incidente. Elas possuem temperaturas mais amenas e são aquecidas pelo efeito gravitacional dos planetas gigantes que orbitam. A variação gravitacional cria um efeito de maré que acaba por aquecer essas luas, pela deformação mecânica delas (que aquece, como uma barra de metal quando é amassada e torcida) (Lammer et al., 2009).

Apesar de ser uma lua gelada, ou seja, ter sua superfície coberta totalmente por uma camada de gelo, Europa é tida atualmente

como um dos ambientes extraterrestres mais propícios a abrigar vida. Isso pelo fato de ter um oceano de água líquida abaixo dessa camada de gelo, com temperaturas amenas e possuir muita matéria orgânica.

Titã é outra lua bastante interessante pelas marcas de rios que foram observadas em sua superfície, mostrando que possui atividades hidrológicas. Um fato interessante é que o solvente presente nessa lua não é água, mas, sim, hidrocarbonetos, como metano e etano. Trata-se, como Europa, de uma lua com grande quantidade de matéria orgânica, mas a presença de solventes orgânicos faz os cientistas especularem se a vida como existe na Terra poderia sobreviver a essas condições ou se seria necessário um tipo de vida distinto. De qualquer maneira, Titã provavelmente é um enorme laboratório para química orgânica, gerando, talvez, moléculas importantes para a química prebiótica até hoje, usando como fonte de energia para essas reações o impacto de micrometeoros, asteroides e raios cósmicos (Sagan et al., 1992).

Por fim, Encélado também possui oceano sob a camada superficial de gelo, tendo sido observados gêiseres de água gelada em um de seus polos, apresentando ainda atividade geológica movida pelas forças gravitacionais. Acredita-se atualmente que a atividade geológica é fundamental para a presença de vida, ao menos a baseada no exemplo de nosso planeta (Matson et al., 2007).

A forma de estudo desses corpos do Sistema Solar pode ser por estudos remotos, como telescópios, ou por estudos locais, por missões que os orbitam ou pousam neles, como as sondas e rovers enviados. Por causa da importância e do impacto destes últimos na ciência e no imaginário popular, eles serão discutidos em mais detalhes adiante.

Missões de busca de vida fora da Terra

Apesar de muito se propagandear sobre sondas enviadas a outros corpos celestes para a busca de vida extraterrestre, não é costume da Nasa e nem de nenhuma outra agência espacial o envio de missões especificamente para esse fim. Cada sonda é enviada

com uma série de equipamentos que visam conhecer a geologia, condições atmosféricas e climáticas do ambiente e, em muitos casos, a presença de matéria orgânica ou de indícios de vida. Os projetos de busca de vida dessas missões acabam sendo bastante difundidos por causa do grande apelo desse tema junto ao público e à necessidade de amplo apoio popular a essas iniciativas, pelos seus altos custos.

Diversas missões foram enviadas a diferentes corpos do Sistema Solar, não somente por norte-americanos, mas também por soviéticos e com participação de outros países, algumas dessas missões apenas orbitando os corpos do Sistema, outras pousando. Diversas fracassaram nesse período, mas as que tiveram êxito contribuíram para o avanço do conhecimento do Sistema Solar.

O primeiro destaque para experimentos de busca de vida fora da Terra são as missões *Viking 1* e *2* (1975-1982) que pousaram em Marte com os seguintes objetivos: estudar a biologia, a química, a física e outras propriedades da atmosfera e da superfície marciana, visando entender o planeta e seu potencial para a vida (Klein, 1978) (Figura 11.4) . Para não invalidar uma eventual descoberta de vida extraterrestre com suspeitas de contaminação cruzada, houve uma grande preocupação com a esterilização dos equipamentos.



Figura 11.4. Imagem da *Viking 2* na superfície de Marte. Fonte: Nasa/JPL

Como não se sabia que tipo de organismo poderia estar presente naquele planeta, três experimentos foram enviados, baseando-se em pressuposições diferentes.

Um dos experimentos partia do pressuposto de que os micro-organismos ali presentes seriam diferentes dos encontrados na Terra e que a melhor maneira de incentivar seu metabolismo seria mantendo-os nas mesmas condições do ambiente. Dessa forma, uma mistura de monóxido e dióxido de carbono marcados com um isótopo de carbono foi misturada ao solo, na esperança de que algum organismo incorporasse esses átomos em moléculas orgânicas complexas, que poderiam ser medidas, provando-se o metabolismo. Nenhum sinal que pudesse ser atribuído à vida foi detectado.

Dois experimentos partiam de outro pressuposto: uma possível forma de vida encontrada em Marte seria semelhante à da Terra, utilizando as mesmas fontes de energia e tendo o mesmo metabolismo, produzindo gás carbônico ou metano, que poderia ser detectado. Para tanto, jogou-se no solo água pura ou com matéria orgânica e tentou-se detectar sinais de metabolismo pela liberação de gás carbônico.

De fato, constatou-se um resultado positivo, que trouxe a esperança aos pesquisadores de terem encontrado sinal de vida naquele planeta. Após outros estudos, percebeu-se que a superfície marciana tinha uma composição mineral diferente do que se esperava e que era mais oxidante, causando a degradação daquela matéria orgânica usada como nutriente. Concluiu-se que os resultados observados tinham natureza puramente química e não biológica, sendo um falso positivo.

Nenhum desses experimentos produziu sinal que os cientistas pudessem caracterizar como vida, mas essas missões não foram consideradas como fracasso. As informações que elas obtiveram sobre o planeta foram bastante importantes para o seu melhor entendimento e a tecnologia desenvolvida serviu para futuras missões.

Após as missões *Viking*, a *Mars Pathfinder* (1997) teve grande destaque pelo seu caráter inovador, com pouso por paraquedas

e *airbags* em vez de retrofoguetes, como a *Viking*, e por carregar o Sojourner, primeiro rover bem-sucedido a chegar e andar pela superfície marciana transmitindo dados pela internet. Possuía câmeras, sensor a laser para evitar rochas e crateras e equipamentos para estudo da superfície marciana.

Novas missões com sondas como os rovers gêmeos Spirit e Opportunity (lançados em 2003) e como a estacionária *Phoenix* (lançada em 2007) foram lançadas para avançar o conhecimento sobre o planeta, a composição mineral, a história da água líquida e a possibilidade de vida microbiana. Os rovers pousaram na região equatorial de Marte e eram equipados com diversos espectrômetros, tais como de emissão térmica, Mössbauer e raios X (Arvidson et al., 2006; Squyres et al., 2006), enquanto a *Phoenix* pousou no polo e continha equipamentos de eletroquímica, condutividade, analisador de gases, entre outros (Smith et al., 2008). Esta última perdeu comunicação com a Terra, sendo que seus objetivos foram parcialmente cumpridos.

Missões para outros corpos celestes foram realizadas, entre as quais destaca-se a *Cassini*, que estudou Saturno, e em particular a sonda *Huygens*, assim batizada em homenagem ao astrônomo holandês. Essa sonda estudou os ciclos meteorológicos, pousou e fotografou a superfície de Titã, mostrando a existência de ciclos hidrológicos e lagos de hidrocarbonetos.

Em 2012, pousou em Marte a mais moderna das sondas, conhecida como MSL (*Mars Science Laboratory*), também chamada de *Curiosity*. Essa missão, montada sobre um gigantesco rover (para os padrões de exploração espacial – é do tamanho de um carro pequeno), está equipada com modernos instrumentos de espectroscopia, de imagens, entre outros, novamente concentrando-se no passado geológico e hidrológico do planeta. Ela está explorando a cratera Gale nos últimos anos e apresentou diversos resultados, como a evidência de que no passado de Marte havia água líquida em sua superfície (Grant, 2014) e ainda hoje estão presentes em solo marciano os elementos químicos essênciais para a vida como a conhecemos (carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio, fósforo

e enxofre) (Grotzinger, 2014). Pensando no futuro, a *Curiosity* representa o primeiro passo para uma missão que irá trazer para a Terra amostras de Marte para estudo.

A Agência Espacial Europeia (ESA) planeja uma missão a Marte, conhecida como ExoMars, com lançamento para 2018, cujo grande atrativo será o estudo da região abaixo da superfície (até 2 metros), possibilitando sair da região oxidante e com grande incidência de radiação e focando o subsolo, onde sabemos ter água (sólida e até mesmo líquida, em alguns locais), que pode abrigar vida (Parnell et al., 2007).

Está planejado também, para meados de 2020, uma missão não tripulada conhecida como Europa Jupiter System Mission – Laplace (EJSM/Laplace), a ser executada em conjunto pela Nasa e ESA (Agência Espacial Europeia) que terá como objetivo o estudo de Júpiter, especialmente sua magnetosfera e suas luas, com ênfase em Europa, onde deve realizar estudos *in situ*, e Ganimedes, abrangendo também Io, Calisto e outras (Blanc et al., 2009).

Essa missão terá como um de seus objetivos estudar as condições de habitabilidade dessas luas, caracterizando seus oceanos subsuperficiais, as crostas de gelo, composição e química desses ambientes, procurando possíveis locais de interesse para futuros estudos *in situ*.

Referências

ARVIDSON, R. E. et al. Overview of the Spirit Mars Exploration Rover Mission to Gusev Crater: landing site to Backstay Rock in the Columbia Hills. *Journal of Geophysical Research*, v. 111, E02S01, p. 1991-2012, 2006.

BENNER, S. A.; RICARDO, A.; CARRIGAN, M. A. Is there a common chemical model for life in the universe? *Current opinion in chemical biology*, n. 8.6, p. 672-689, 2004.

BLANC, M. et al. Laplace: a mission to Europa and the Jupiter System for ESA's Cosmic Vision Programme. *Experimental Astronomy*, v. 23, n. 3, p. 849-892, 2009.

BLUMBERG, B. S. The Nasa astrobiology institute: early history and organization. *Astrobiology*, v. 3, n. 3, p. 463-470, 2003.

CROWE, M. J. A history of the extraterrestrial life debate. *Zygon*, v. 2, n. 2, p. 16, 1997.

DES MARAIS et al. The Nasa Astrobiology Roadmap. *Astrobiology*, v. 8, n. 4, p. 715-730, 2008.

DICK, S. J. *Plurality of worlds*: the origins of the extraterrestrial life debate from Democritus to Kant. Cambridge Cambridgeshire; New York: Cambridge University Press, 246 p, 1982.

GRANT, J. A. et al. The timing of alluvial activity in Gale crater, Mars. *Geophysical Research Letters*, v. 41, n. 4, p. 1142-1149, 2014.

GROTZINGER, J. P. et al. A habitable fluvio-lacustrine environment at Yellowknife Bay, Gale Crater, Mars. *Science*, v. 343, n. 6169, 2014.

GROTZINGER, J. P. et al. Mars Science Laboratory mission and science investigation. *Space science reviews*, v. 170, n. 1-4, p. 5-56, 2012.

KLEIN, H. P. The Viking biological experiments on Mars. *Icarus*, v. 34, n. 3, p. 666-674, 1978.

LAMMER, H. et al. What makes a planet habitable? *Astron. Astrophys. Rev.*, v. 17, n. 2, p. 181-249, 2009.

MATSON, D. L. et al. Enceladus' plume: compositional evidence for a hot interior. *Icarus*, v. 187, n. 2, p. 569-573, 2007.

MCKAY et al. Search for Past Life on Mars: Possible Relic Biogenic Activity in Martian Meteorite ALH84001. *Science*, v. 273, n. 5277, p. 924-930, 1996.

MOROWITZ, H.; SAGAN, C. Life in the clouds of Venus? *Nature*, n. 215, p. 1259-1260, 1967.

PARNELL, J. et al. Searching for life on Mars: selection of molecular targets for ESA's aurora ExoMars mission. *Astrobiology*, v. 7, n. 4, p. 578-604, 2007.

ROTHSCHILD, L. J.; MANCINELLI, R. L. Life in extreme environments. *Nature*, v. 409, n. 6823, p. 1092-1101, 2001.

SAGAN, C. et al. Titan: a laboratory for prebiological organic chemistry. *Accounts of Chemical Research*, v. 25, n. 7, p. 286-292, 1992.

SMITH, P. H. et al. Introduction to special section on the phoenix mission: landing site characterization experiments, mission overviews, and expected science. *Journal of Geophysical Research*, v. 113, n. E3, p. 1991-2012, 2008.

SQUYRES, S. W. et al. Overview of the opportunity mars exploration rover mission to meridiani planum: Eagle crater to purgatory ripple. *Journal of Geophysical Research*, p. 1991-2012, v. 111, n. E12S12, 2006.

SUMMONS, R. E. et al. Molecular biosignatures. *Space Science Reviews*, v. 135, n. 1-4, p. 133-159, 2008.

WESTALL, F. The nature of fossil bacteria: a guide to the search for extraterrestrial life. *Journal of Geophysical Research*, v. 104, n. E7, p. 16437-16451, 1999.

LUAS GELADAS DO SISTEMA SOLAR

CAPÍTULO 12

Douglas Borges de Figueiredo

Introdução

Luas geladas constituem uma classe de satélites naturais que orbitam os gigantes gasosos do nosso Sistema Solar e cuja superfície é composta principalmente por gelo. Embora diversos satélites sejam classificados como luas geladas, estas apresentam características muito distintas, especialmente quanto à capacidade de promover o surgimento e a manutenção da vida.

Irwin e Schulze-Makuch (2001) consideraram que existem três requisitos mínimos para o surgimento e a manutenção da vida: 1) presença de um meio líquido; 2) uma fonte de energia; 3) componentes e condições que possibilitem reações químicas capazes de formar moléculas complexas. Nessas condições, assume-se que a vida seria capaz de surgir e de se adaptar a mudanças do ambiente. Assim, a possibilidade de haver vida em um corpo celeste seria tão grande quanto sua capacidade de suprir essas necessidades.

Observando a Tabela 12.1, nota-se a inclusão de algumas das luas geladas de Júpiter, Saturno e Netuno em diferentes classificações da escala, o que reforça as distinções entre esses satélites. Europa e Ganimedes, ambas luas jovianas, possuem evidências da existência de oceanos de água líquida no seu interior, de núcleo rochoso, energia geotérmica, gerada pelo decaimento radiológico de material do núcleo e pela dissipação de maré causada pela interação com Júpiter, e evidências de química complexa, o que as coloca no ranking II dessa lista e as torna alvos primários na busca de vida fora da Terra no Sistema Solar.

Tabela 12.1. Escala de Plausabilidade de Vida (PV) de Irwin e Schulze-Makuch

Classificação	Definição	Exemplos
I	Presença confirmada de água líquida, energia disponível prontamente acessível e presença de compostos orgânicos	Terra
II	Evidências, no passado ou no presente, de água líquida, disponibilidade de energia e presença inferida de compostos orgânicos	Marte, Europa, Ganimedes
III	Condições físicas extremas, mas com evidência de fontes de energia e química complexa possivelmente adequada para formas de vida desconhecidas na Terra	Titã, Tritão, Encélado
IV	Inferências aceitáveis sobre condições adequadas, no passado, para o surgimento da vida, antes do desenvolvimento de condições tão adversas a ponto de que sua existência hoje seria improvável, mas possível em ambientes isolados	Mercúrio, Vênus, Io
V	Condições tão desfavoráveis para a vida, a partir de qualquer definição razoável, que sua origem e permanência não podem ser consideradas uma probabilidade realista	Sol, Lua, planetas gigantes gasosos

Fonte: Adaptado de Irwin e Schulze-Makuch (2001)

Outras luas de Júpiter, Calisto e Io, por outro lado, encontram-se nos rankings III e IV, respectivamente. Calisto, a lua mais distante de Júpiter pode possuir um oceano líquido em seu interior, mas parece ser menos diferenciada e sua superfície antiga é um indício de pouca atividade geológica e de menor disponibilidade de energia. Io possui energia abundante, mas pouca água e

carbono disponíveis, tornando a existência de vida como a conhecemos na Terra pouco provável. As classificações e características gerais dos diversos satélites dos gigantes gasosos do nosso Sistema Solar podem ser vistos na Tabela 12.2. A seguir, serão discutidas com maior profundidade as características de seis luas geladas, Io, Tritão, Ganimedes, Europa, Titã e Encélado, dando ênfase aos aspectos mais importantes para a habitabilidade desses satélites.

Io

Características gerais

Orbitando a uma distância de 421.700 km do centro de Júpiter, Io é a lua mais próxima do gigante gasoso. Possui formato elipsoide, com seu eixo mais longo direcionado para Júpiter. Seu diâmetro é de 3.642 km e sua massa de aproximadamente 8.932×10^{22} kg, sendo a segunda menor lua dos satélites galileanos, à frente apenas de Europa, e é o mais denso dos satélites de Júpiter (d=3,527 g/cm^3) (Schubert et al., 2004). Medidas obtidas pelas sondas *Galileo* e *Voyager* sugerem que o interior de Io é diferenciado entre um núcleo de ferro e de pirita (FeS_2), que corresponde a cerca de 20% de sua massa, manto e crosta ricos em silicatos (Anderson et al., 2001). A ausência de um campo magnético intrínseco indica que o núcleo de Io é sólido (Figura 12.1).

Com mais de 400 vulcões ativos, Io é o objeto com maior atividade geológica no Sistema Solar. Devido ao vulcanismo, a superfície de Io é praticamente desprovida de crateras de impactos, já que é constantemente coberta do material expelido pelas erupções. Tal material, rico em compostos de enxofre, como dióxido de enxofre (SO_2), e silicatos confere uma coloração amarelada ao satélite (Figura 12.1). A temperatura média na superfície de Io é de 143 K, mas pode chegar até 1.900 K próximo a locais de atividade vulcânica, temperatura alta o bastante para manter a lava líquida. Alguns veios vulcânicos ejetam SO_2 gasoso na atmosfera, que condensa e se deposita na superfície como neve (Schulze-Makuch, 2010), além de poder ser ejetado e atingir as luas vizinhas, como Europa.

Tabela 12.2. Classificação dos satélites de Júpiter, Saturno, Urano e Netuno na escala de Plausabilidade de Vida de Irwin e Schulze-Makuch (2001)

Corpo	pv	Água	Química	Energia	Plausabilidade de Vida
Luas de Júpiter					
Io	iv	Atividade vulcânica cria uma atmosfera fina	Coloração da superfície → química complexa	Geotérmica (força de maré, decaimento radioativo); química; magnética	Baixa – gradientes térmicos bruscos e ciclo geotérmico, porém com temperaturas e radiação muito adversas
Europa Ganimedes	ii ii	Superfície de gelo de água; campo magnético e renovação da superfície → água líquida	Coloração da superfície → química complexa e reciclagem química	Geotérmica (força de maré, decaimento radioativo); radiação jupiteriana	Favorável – muitas fontes de energia; provável presença de água no subsolo; ciclo geoquímico
Calisto	iii	Baixa densidade → principalmente gelo de água		Geotérmica (força de maré limitada, decaimento radioativo); radiação jupiteriana	Moderada – possível presença de água líquida no subsolo, mas pouco fluxo de energia
Luas de Saturno					
Tétis Dione Reia	iv iv iv	Densidade muito baixa e albedo alto; principalmente gelo de água		Magnética; forte radiação saturniana	Baixa – pouca evidência de água líquida

continua...

Tabela 12.2. *Continuação*

Corpo	pv	Água	Química	Energia	Plausabilidade de Vida
Encélado	iii	Superfície renovada com frequência; evidência de gêiseres de gelo		Geotérmica (força de maré); magnética; de convecção	Moderada – possível presença de água no subsolo com diversas fontes de energia
Iapetus	iv	Baixa densidade e albedo moderado → principalmente gelo	Borda escura divisória → química de hidrocarbonetos	Química	Baixa – não há evidências de água líquida até o momento
Titã	iii	Densidade ≅ 1,8 → líquidos orgânicos e/ou gelo de água, com núcleo sólido	Atmosfera densa, colorida → química complexa	Química; geotérmica (decaimento radioativo)	Moderada – química orgânica complexa e atmosfera com capacidade de redução química
Luas de Urano					
Titânia	iii	Evidência de fluxo de líquidos nos cânions		Geotérmica	Moderada – possibilidade de líquidos no subsolo e líquidos recentes na superfície
Ariel Miranda Umbriel Oberon	iv iv iv iv	Densidades e albedo altos ≅ 1,5-1,7 → rocha/gelo		Geotérmica?	Baixa – luas pequenas, e há pouca evidência de gradientes de energia

continua...

Tabela 12.2. *Continuação*

Corpo	pv	Água	Química	Energia	Plausabilidade de Vida
Luas de Netuno					
Tritão	iii	Densidade ≅ → núcleo rochoso com água/superfície de gelo	Coloração da superfície → química complexa, características incomuns da superfície → energia interna	Química; órbita elíptica → força da maré e temperaturas sazonais	Moderada – química complexa e diversas fontes de energia, com a possível presença de líquidos no subsolo
Cometas e asteroides	v	Mistura rocha/gelo	Água congelada em abundância; possível alteração hidrotérmica em corpos parentais	Química	Remota – extremamente frios; não há atmosfera e nenhuma fonte interna de energia constante

Fonte: Adaptado de Irwin e Schulze-Makuch (2001)

Io possui uma atmosfera fina, composta principalmente por SO_2 e, em menor quantidade, por monóxido de enxofre (SO), cloreto de sódio (NaCl) e por oxigênio e enxofre atômicos. A atmosfera de Io é constantemente removida pela magnetosfera de Júpiter e reposta por plumas vulcânicas e por sublimação do SO_2 congelado na superfície.

Por causa da ressonância orbital com Europa e Ganimedes, Io possui uma órbita excêntrica em relação a Júpiter, ou seja, sua órbita não é totalmente circular. Essa excentricidade causa a dissipação de energia no interior do satélite, e o atrito entre as camadas internas resulta no aquecimento da lua (aquecimento de maré). A quantidade de energia proveniente do aquecimento de maré é até 200 vezes maior do que a energia produzida pelo decaimento radiológico do núcleo de Io, sendo o bastante para derreter uma parcela do manto e criar um oceano de lava abaixo da superfície (Science Daily, 2011).

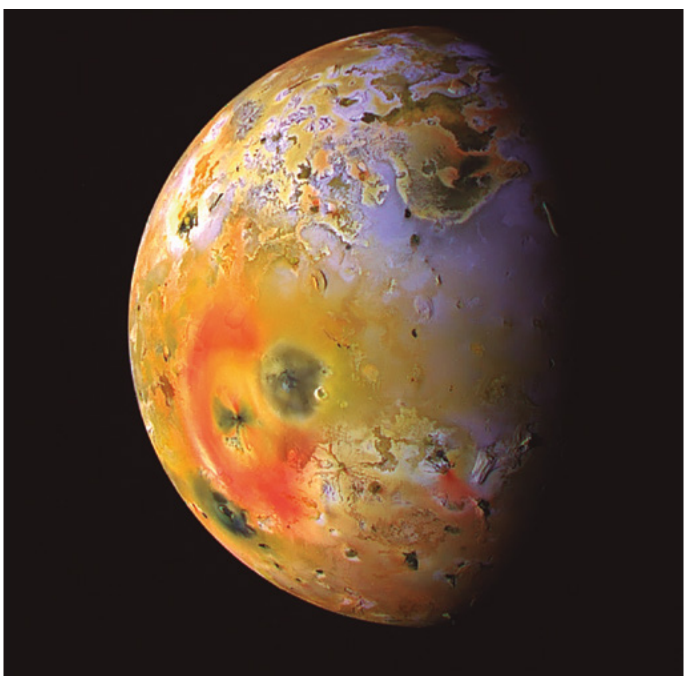


Figura 12.1. Visão global de Io. Fonte: Nasa/JPL/University of Arizona

Habitabilidade

Io possui classificação IV na Escala de Plausabilidade de Vida (Irwin; Schulze-Makuch, 2001). Estão nessa categoria corpos celestes que, no passado, podem ter tido condições razoáveis para o surgimento da vida, mas que desenvolveram condições tão abrasivas que tornaram a existência de vida hoje em dia pouco provável, mas concebível em ambientes isolados.

A baixa probabilidade de vida em Io se deve principalmente à pouca quantidade de água detectada na atmosfera e na superfície, à não detecção de compostos orgânicos na superfície e à interação com partículas de plasma extremamente energéticas provenientes de Júpiter. Embora a temperatura média na superfície seja muito fria, existem locais quentes (500 a 600 K). A temperatura média na depressão vulcânica Loki Patera, por exemplo, é de 273 K. Modelos da formação de Io sugerem que ela se formou em uma região do Sistema Solar rica em água e que sua temperatura média era de aproximadamente 250 K, sendo plausível a formação de vida. À medida que a temperatura na superfície foi diminuindo e a água foi sendo perdida, a vida poderia ter se refugiado em ambientes mais amenos no subsolo, onde ainda poderia haver água e dióxido de carbono (Schulze-Makuch, 2010).

Abaixo da superfície, tubos de lava resultantes do vulcanismo acentuado de Io poderiam representar ambientes habitáveis, pois seriam capazes de prover proteção contra radiação, reter umidade, prover nutrientes e apresentar temperatura mais amena do que a da superfície. Na Terra, micro-organismos são comumente encontrados em tubos de lava, independente do ambiente externo (Figura 12.2).

Há poucas evidências sobre compostos de carbono na superfície ou no interior de Io, o que obrigaria eventuais micro-organismos a basearem sua estrutura e metabolismo em outras moléculas. No caso de Io, o enxofre pode ter um papel importante como bloco construtor da vida. Diversos compostos de enxofre foram encontrados em Io e, embora não tenham sido

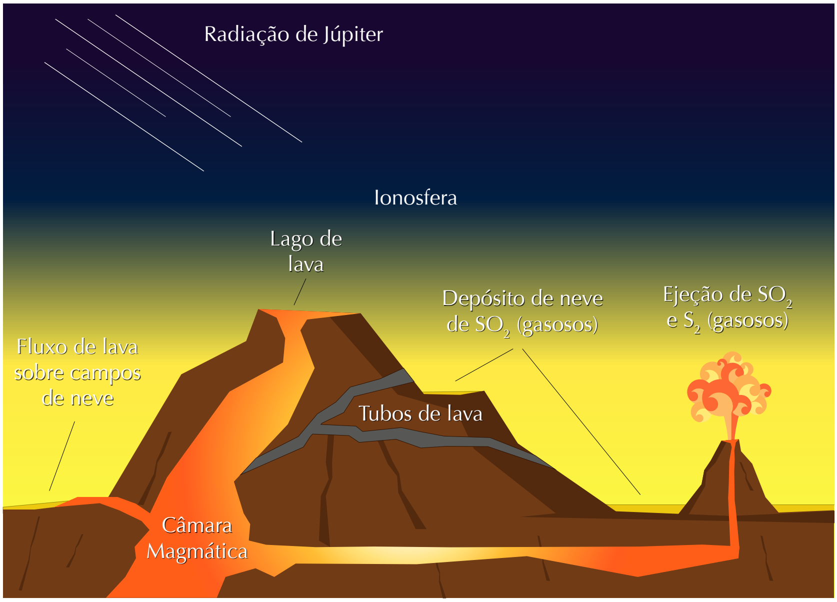


Figura 12.2. Representação esquemática mostrando tubos de lava como possíveis habitats para a vida em Io. Ilustração: Maurício Marcelo / Tikinet | Adaptado de Schulze-Makuch (2010)

encontradas moléculas de complexidade comparável a compostos biológicos, como aminoácidos e proteínas, elas poderiam existir, visto que o enxofre ocorre em vários estados de oxidação e é capaz de formar diversas estruturas poliméricas e cíclicas com carbono, nitrogênio, oxigênio e fósforo. Além de servir como bloco construtor da vida, o enxofre poderia servir como solvente para as reações químicas necessárias à vida nessa lua. Um solvente líquido apropriado deve propiciar um ambiente capaz de manter a estabilidade das ligações químicas para preservar a estrutura das macromoléculas, ao mesmo tempo que promove a dissolução de outras ligações para novas reações. Deve ser capaz de solubilizar solutos diversos, mas também permitir que macromoléculas permaneçam insolúveis, promovendo estabilidade estereoquímica, superfícies e interfaces para reações. Além disso, deve ter densidade adequada para manter concentrações críticas de reagentes e evitar sua dispersão e também servir como tampão contra variações ambientais.

Em Io, sulfeto de hidrogênio (H_2S), dióxido de enxofre (SO_2) e ácido sulfúrico (H_2SO_4) seriam candidatos para substituir a água como solventes apropriados para a vida (Schulze-Makuch, 2010).

Sulfeto de hidrogênio parece ser razoavelmente abundante no subsolo de Io. O gás tem baixo calor de fusão (2,4 kJ/mol) e baixo calor de vaporização (18,7 kJ/mol) e é pouco eficiente para moderar a temperatura. Além disso, tem baixa constante dielétrica (5,9) e baixo momento dipolar (0,98), sendo ineficiente como solvente iônico. Por outro lado, é capaz de dissolver diversas substâncias, incluindo compostos orgânicos. De maneira análoga à água que se dissocia em H^+ e OH^-, pode se dissociar em H^+ e HS^-, este podendo substituir o grupo hidroxila em compostos orgânicos. Seus pontos de fusão e ebulição são, respectivamente, 187 e 213 K (1 bar). Assim, ele poderia permanecer líquido quando aquecido pela lava e qualquer forma de vida que estivesse adormecida nas proximidades poderia se tornar ativa.

O dióxido de enxofre possui momento dipolar maior do que o H_2S (1,6), permanece líquido em um intervalo maior de temperatura (198 a 163 K, 1 bar) e é abundante em Io. Por outro lado, a ligação dupla presente na molécula de SO_2 poderia dificultar reações bioquímicas, já que um rearranjo molecular seria necessário. Ademais, o SO_2 não é um solvente baseado em próton. Uma vez que macromoléculas biológicas como ácidos nucleicos são formadas via ligação de hidrogênio, solventes que não sejam baseados em prótons precisam superar grandes barreiras energéticas para reagir com essas moléculas.

Por fim, o ácido sulfúrico tem momento dipolar maior do que o da água (2,7), alta constante dielétrica (101), alta viscosidade (0,26 P) e permanece líquido em uma grande faixa de temperatura (283 até 610 K). Contudo, a ausência de água em Io torna pouco provável a presença de grande quantidade de H_2SO_4, e qualquer forma de vida capaz de sobreviver em um ambiente de ácido sulfúrico teria uma bioquímica substancialmente diferente daquela encontrada na Terra (Schulze-Makuch, 2010).

Apesar da falta de compostos de carbono e de solventes apropriados, a atividade geotérmica abundante e compostos reduzidos

de enxofre poderiam suprir micro-organismos com energia abundante (Irwin; Schulze-Makuch, 2001).

Mesmo que Io tenha possuído potencial para gerar e sustentar vida no passado e que atualmente existam energia em abundância e ambientes no subsolo menos abrasivos do que a superfície, a falta de água e moléculas orgânicas torna a possibilidade de vida nessa lua muito baixa. Levando em consideração que o próprio Sistema Joviano tem alvos muito mais promissores para a busca de vida fora da Terra, uma missão para Io seria pouco justificada. Ainda assim, futuras missões para Europa ou Ganimedes poderiam dedicar algum tempo para estudar Io, visto que seu vulcanismo, densidade e composição o tornam singular em nosso Sistema Solar.

Tritão

Características gerais

Tritão é a maior das luas de Netuno, com diâmetro de aproximadamente 2.700 km e massa de $2,14 \times 10^{22}$ Kg, correspondendo a 99,5% de toda a massa que orbita Netuno. Modelos da estrutura interna do satélite indicam que possui um núcleo de silicatos com aproximadamente 950 km de raio (Gaeman; Hier-Majumder; Roberts, 2012). A superfície de Tritão é jovem e apresenta poucas crateras de impacto, o que se deve à atividade geológica recente. Imagens da *Voyager* indicaram três tipos de terreno distintos na superfície: planícies vulcânicas, calotas polares e terreno cantaloupe (McKinnon; Kirk, 2007) (Figura 12.3).

Observações da superfície e análise espectral da *Voyager* indicaram que a superfície de Tritão é composta predominantemente por N_2, H_2O e CO_2 congelados, além de CO e CH_4 em menores quantidades. Modelos da composição química da nébula pré-solar onde o satélite se originou sugerem a presença de até 15% de NH_3 no interior de Tritão (Gaeman; Hier-Majumder; Roberts, 2012). A temperatura média na superfície é 35,6 K. Sua atmosfera é rarefeita e composta principalmente por N_2 e traços de CO_2 e CH_4 próximos à superfície.

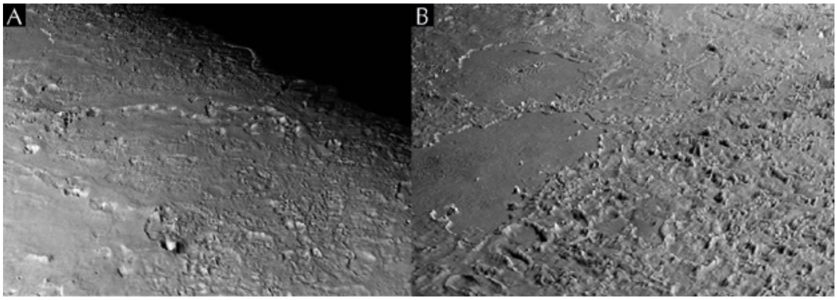


Figura 12.3. Terrenos distintos da superfície de Tritão: (A) planície vulcânica e (B) terreno Cantaloupe. Fonte: Nasa/JPL/Universities Space Research Association/Lunar & Planetary Institute

Formação e órbita

Tritão é a única das grandes luas do Sistema Solar a apresentar uma órbita retrógrada, ou seja, que segue na direção oposta à órbita do seu planeta. Outros objetos com órbitas retrógradas são algumas das luas exteriores de Júpiter e Saturno, mas são luas muito distantes dos seus planetas e com tamanho muito inferior ao de Tritão. Essa lua apresenta rotação sincrônica com Netuno e sua órbita é quase totalmente circular.

Por causa de sua órbita peculiar, levantou-se a hipótese de que Tritão teria se formado no Cinturão de Kuiper (McKinnon; Kirk, 2007), tendo sido capturado posteriormente por Netuno (Agnor; Hamilton, 2006). Uma hipótese para a captura sugere que Tritão e um segundo corpo de tamanho similar formaram um sistema binário com o Sol (Agnor; Hamilton, 2006), e à medida que esse sistema se aproximou de Netuno, Tritão foi capturado pela gravidade do planeta. Outra hipótese sugere que a lua foi capturada durante uma ou várias passagens próximas a Netuno, que dissiparam a energia orbital por arrasto hidrodinâmico (McKinnon; Leith, 1995). Uma vez capturada, a cada passagem da lua, a gravidade de Netuno levantava marés na superfície do satélite, dissipando energia em seu interior, o que levou a órbita heliocêntrica e altamente elíptica de Tritão a circularizar-se até a órbita atual, com excentricidade próxima a zero.

Existem dois modelos sobre o tempo de circularização da órbita de Tritão. Segundo Ross e Schubert (1990), ocorreu lentamente ao longo de aproximadamente 800 Ma após sua captura. Ćuk e Gladman (2005), por outro lado, sugerem que a captura de Tritão perturbou os satélites preexistentes de Netuno, levando a colisões e à formação de um disco de detritos. A interação de Tritão com esse disco alterou rapidamente sua órbita, que teria se tornado circular rapidamente (6.100 anos). A circularização da órbita de Tritão teria dissipado uma grande quantidade de calor dentro do satélite, derretendo a camada de gelo e formando um oceano global, o que poderia ter criado condições para que a vida surgisse em Tritão no passado.

Habitabilidade

A existência de vida, como a conhecemos na Terra, em Tritão depende da existência de água líquida sob a superfície. Um oceano abaixo da crosta de gelo de Tritão poderia ser mantido pela energia liberada em seu interior através da dissipação de maré e do decaimento radiológico do seu núcleo. Com base na densidade de Tritão e na abundância de elementos radiogênicos em seu núcleo, Brown et al. (1991) estimaram que um fluxo entre aproximadamente 0,75 e 1,5 × 10^{11} W de calor é gerado pelo decaimento radioativo no núcleo de Tritão. Já a dissipação de maré depende diretamente de dois fatores, a excentricidade da órbita de Tritão e da espessura da camada de gelo na superfície.

De acordo com Roberts e Nimmo (2008), a dissipação de maré é proporcional ao quadrado da excentricidade orbital. Dessa forma, após a captura e circularização da órbita de Tritão, a dissipação de maré teria diminuído significativamente. Ao mesmo tempo, crostas de gelo mais finas são mais facilmente deformadas pela maré, aumentando a dissipação. À medida que a crosta aumenta, torna-se mais difícil de deformar, diminuindo a dissipação e liberação de energia no interior de Tritão, levando ao congelamento de um volume maior de água. Contudo, o congelamento total do

oceano levaria ao contato direto da crosta de gelo com o manto e o atrito gerado por este contato causaria um aumento substancial da dissipação de maré (Gaeman; Hier-Majumder; Roberts, 2012).

Observa-se que o calor radiológico é quatro ordens de grandeza maior do que o maior calor de dissipação considerado. Ainda assim, não seria capaz de prevenir a cristalização completa do oceano de Tritão. Apesar de modesta, a dissipação de maré é essencial para a manutenção de um oceano líquido em Tritão e sua habitabilidade.

Embora haja poucas informações sobre o interior de Tritão, o modelo de Gaeman, Hier-Majumder e Roberts (2012) indica que, com excentricidades orbitais a partir de 4×10^{-5}, essa lua seria capaz de manter um oceano líquido e, embora a composição deste seja pouco conhecida, a presença de amônia no oceano e a detecção de carbono na superfície poderiam indicar a possibilidade de reações químicas complexas. Ademais, o contato desse oceano com o manto criaria um cenário mais próximo àquele onde se supõe que a vida surgiu na Terra. Finalmente, sua órbita e origens singulares tornam Tritão um objeto de estudo digno de nota.

Ganimedes

Características gerais

Ganimedes é a maior lua de Júpiter e do Sistema Solar. Com diâmetro de 5.268 km é maior do que o planeta Mercúrio, embora sua massa, $1{,}48 \times 10^{23}$, seja cerca da metade da massa deste planeta. Sua densidade é de 1,936 g/cm^3, o que sugere que seja formada por partes iguais de material rochoso e de água.

A superfície de Ganimedes é formada por um oceano de água congelada intermeado de rochas hidratadas. Dados de espectroscopia próxima ao infravermelho e de espectroscopia UV da sonda *Galileo* detectaram a presença de dióxido de carbono, dióxido de enxofre, cianogênio, hidróxido de enxofre, compostos orgânicos diversos, sulfato de magnésio e sulfato de sódio, estes dois possivelmente originários de um oceano líquido

abaixo da superfície. Sua atmosfera é rarefeita (pressão de 2,5 μPa na superfície) e composta predominantemente por O_2 com traços de O_3 e hidrogênio atômico, todos formados abioticamente pela quebra de moléculas de água por radiação na superfície (Showman; Malhotra, 1999).

Imagens da superfície de Ganimedes revelaram a presença de dois tipos de terreno distintos: um tipo escuro, antigo e marcado por crateras abundantes, e um claro, mais novo e caracterizado por espinhaços e sulcos (Figura 12.4).

O terreno escuro é rico em argilas e material orgânico, e a análise das crateras indica que esse tipo de terreno possui aproximadamente 4,0 Ga. Ganimedes deve ter sofrido um período de impactos intenso entre 4,0 e 3,5 Ga, bem como a Terra e a Lua. Assim como em Europa, os impactos devem ter penetrado significativamente na superfície de gelo, ejetando grande quantidade de material do subsolo para a superfície. Supondo que Ganimedes pudesse ter abrigado vida no passado e que esta tivesse surgido aproximadamente na mesma época em que surgiu na Terra, as crateras da região escura do satélite seriam bons alvos de estudo para a astrobiologia (Lipps et al., 2004).

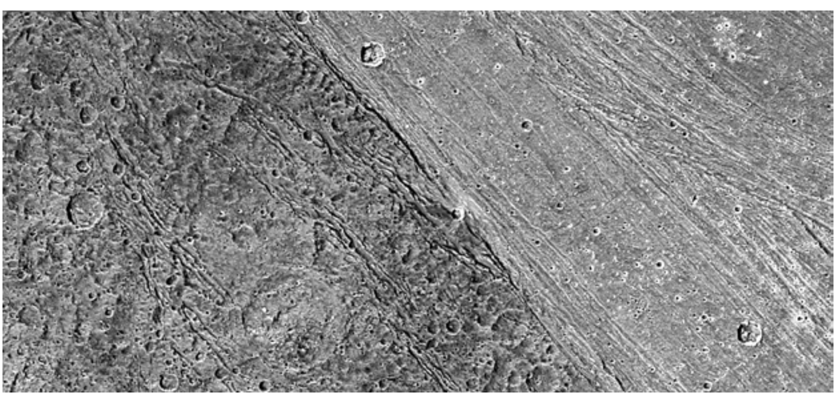


Figura 12.4. Terrenos distintos de Ganimedes. Terreno escuro (esquerda) marcado por crateras de impactos ocorridos entre 4,0 e 3,5 Ga, e terreno claro (direita) renovado por tectonismo. Fonte: Nasa/JPL/DLR

Formação, diferenciação e a magnetosfera de Ganimedes

Ganimedes parece ser um satélite completamente diferenciado, o que se deve à sua formação. O modelo mais aceito para sua formação diz que o satélite teria se formado através da agregação de material planetesimal presente na esfera de Hill de Júpiter (Canup; Ward, 2002). Por ter se formado em uma região mais próxima a Júpiter, onde o disco de material era mais denso, Ganimedes deve ter se formado rapidamente (≅ 10 mil anos) (Mosqueira; Estrada, 2003). Isso evitou o escape do calor de agregação que, com o calor de maré, levaram ao derretimento do gelo e à separação do material rochoso, que foi para o centro formando o núcleo. (McKinnon, 2006; Showman; Malhotra, 1999). Após a formação o calor acumulado no núcleo foi gradativamente sendo liberado para o manto de gelo e para a superfície por convecção. O decaimento radiológico dentro do núcleo teria continuado a aquecê-lo, levando à diferenciação do interior do satélite em um núcleo de ferro, sulfeto de ferro e um manto de silicatos (Hauck; Aurnou; Dombard, 2006). As passagens da *Galileo* por Ganimedes revelaram que o satélite possui um momento magnético intrínseco forte o bastante para gerar uma magnetosfera própria dentro da magnetosfera de Júpiter, sendo a única lua do nosso Sistema Solar com essa característica. Dada a diferenciação e presença de um núcleo metálico líquido, acredita-se que a magnetosfera de Ganimedes seja gerada pelo movimento de material condutor em seu interior (Hauck; Aurnou; Dombard, 2006), de forma semelhante ao que ocorre na Terra. A principal espécie iônica na magnetosfera de Ganimedes é O^+, o que condiz com a composição da atmosfera do satélite. A interação da magnetosfera de Ganimedes com o plasma proveniente de Júpiter é, de certa forma, semelhante à interação da magnetosfera terrestre com os ventos solares (Volwerk et al., 1999). Nas regiões polares em latitudes superiores a 30º, as linhas do campo magnético se abrem, conectando Ganimedes com a ionosfera de Júpiter. Nessa região o fluxo de elétrons e íons leva ao surgimento de auroras, e íons pesados constantemente

precipitam na superfície, escurecendo o gelo na região dos polos (Paranicas; Paterson, 1999).

Habitabilidade

Acredita-se que Ganimedes, assim como Europa, possua um oceano líquido sob a superfície. E, embora esses dois satélites tenham água líquida, fontes de energia disponíveis e indícios de química complexa, Europa sempre foi considerado um candidato melhor para abrigar vida do que Ganimedes.

A estrutura interna de Europa é consistente com um oceano líquido em contato direto com o manto rochoso, uma condição que se acredita ter sido necessária para o surgimento da vida na Terra. A pressão hidrostática no fundo do oceano de Europa é de aproximadamente 200 MPa, parecida com a pressão nas regiões mais profundas do oceano terrestre. Por outro lado, o tamanho maior de Ganimedes e a maior abundância de água resultam em pressões de até 1,2 GPa nas regiões mais profundas. Essa condição favorece a formação de uma camada de gelo tipo VI, um tipo muito rígido e mais denso do que o oceano líquido. Esse material se depositaria sobre o manto (Figura 12.5), isolando o oceano e dificultando as primeiras reações químicas que dariam origem aos primeiros seres vivos.

Contudo, analisando a oscilação da aurora de Ganimedes, medida através de imagens obtidas pelo telescópio espacial *Hubbl*e, Saur et al. (2015) observaram que a oscilação da aurora era menor do que o esperado dada a influência da magnetosfera de Júpiter (Figura 12.6). Baseado nisso, foi criado um modelo onde um oceano salgado eletricamente condutor abaixo da superfície compensaria a influência da magnetosfera jupiteriana.

De acordo com esse modelo, à medida que o gelo fosse se formando, o sal precipitaria e iria para o fundo, tornando a água mais densa e fazendo o gelo subir. Dessa forma, o oceano seria mais denso do que o gelo tipo VI, descendo para o fundo até encontrar o manto. Acima desse oceano salino haveria camadas intercaladas de água e gelo de densidades distintas. A temperatura

no fundo do oceano, por causa da pressão elevada e a transmissão de calor do manto, seria mais alta do que nas camadas superiores, criando condições mais favoráveis ao surgimento e à manutenção da vida no interior de Ganimedes.

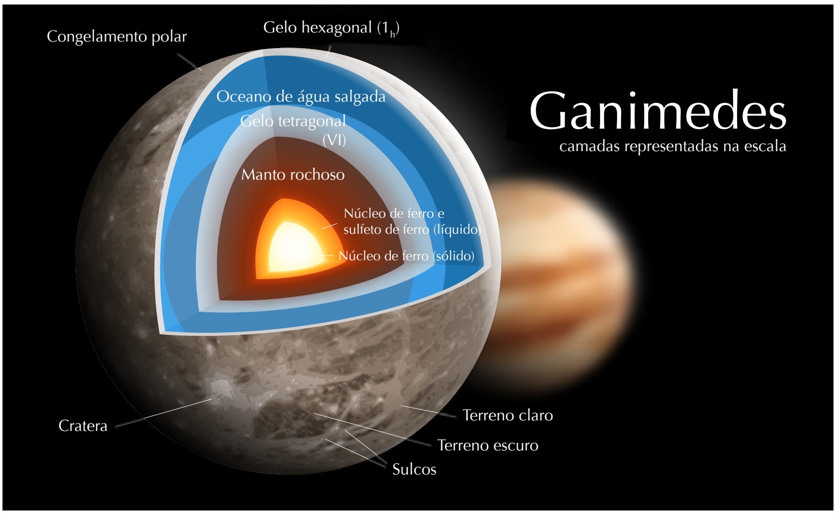


Figura 12.5. Modelo estrutural de Ganimedes. Neste modelo, o oceano líquido estaria aprisionado entre uma camada de gelo tipo VI, muito denso, e uma camada de gelo tipo I, menos denso. Fonte: Kelvin Song/Wikimedia Commons

Mesmo antes da hipótese de um oceano em contato com o manto, Ganimedes já se encontrava na classificação II da Escala de Plausabilidade de Vida, embora sempre atrás de Europa. Trata-se de um satélite com fontes de energia, indícios de química complexa e água líquida, e caso seja confirmado o contato entre o oceano e o manto, Ganimedes se consolidará como um dos ambientes mais propícios à vida em nosso Sistema Solar, comparável à Europa. Além do interesse astrobiológico, a magnetosfera única de Ganimedes, seu tamanho e interação com Júpiter e os outros corpos do Sistema Joviano o tornam um objeto de estudo importante em nosso Sistema Solar, justificando o investimento em missões como a Juice.

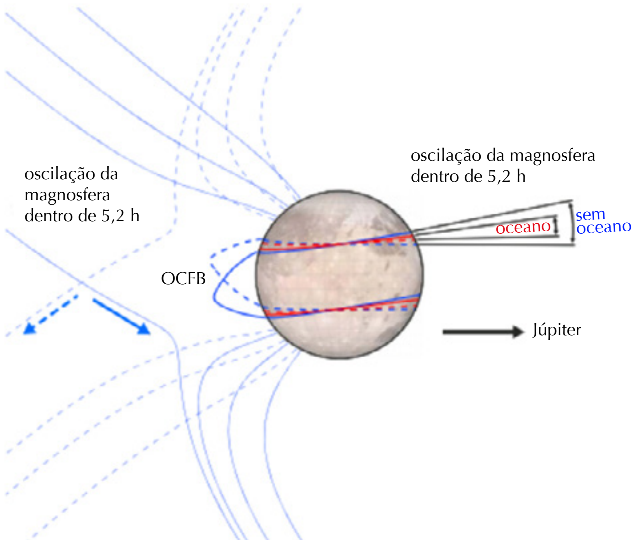


Figura 12.6. Representação esquemática de linhas de campo magnético e da posição da aurora quando Ganimedes está acima (linha pontilhada) ou abaixo (linha sólida) do plano de corrente. *Open-closed field line boundary* (OCFB) é a região onde a aurora se forma. Em azul observa-se a oscilação da aurora na ausência de um oceano condutor e, em vermelho, como é a oscilação considerando um oceano condutor. Fonte: Adaptado de Saur et al. (2015)

Europa

Características gerais

Embora seja a sexta maior lua do Sistema Solar, Europa é a menor das quatro luas geladas de Júpiter, com diâmetro de aproximadamente 3.100 km. Sua grande densidade, 2,99 g/cm^3, aliada a medidas gravitacionais, é consistente com um núcleo metálico sólido formado por ferro e níquel e envolto por uma crosta de silicatos, ambos abaixo de uma camada de água e gelo. A atmosfera de Europa é pouco densa e formada principalmente por oxigênio.

Sobre a crosta de silicatos, estima-se que Europa tenha uma camada de água com 80-170 km de extensão, dividida entre uma crosta congelada na superfície e um oceano líquido abaixo desta. O gelo na superfície de Europa tem albedo elevado (0,64) e reflete

grande parte da luz incidente sobre a superfície de volta para o espaço. Geologicamente, a superfície é plana, recente e com poucas crateras antigas, o que indica que é renovada constantemente. Com base na incidência de bombardeamento a que Europa está submetida, estima-se que sua superfície tenha entre 10 e 100 milhões de anos. Os processos responsáveis pela renovação da superfície de Europa seriam: erupções locais de água aquecida e sob pressão, aprisionada abaixo da superfície; elevação e submersão repetida de sólidos congelados e líquidos em regiões extensas da superfície; ruptura de camadas superficiais de gelo por causa da disrupção de maré; translação e extensão de blocos da superfície e subsequente preenchimento dessas regiões por material vindo do subsolo; disrupção completa da superfície e formação de terreno caótico (Kargel et al., 2000).

Outra característica marcante observada em Europa é a existência de uma série de linhas escuras que cruzam sua superfície (Figura 12.7).

A hipótese mais aceita para a formação dessas linhas diz que devem ter sido formadas por uma série de erupções de gelo aquecido que ocorreram à medida que a crosta de Europa se abria para expor camadas interiores mais quentes (Figueredo; Greeley, 2004), de forma semelhante ao que ocorre nas fendas oceânicas na Terra. Dois mecanismos seriam responsáveis pela formação dessas fendas em Europa. O primeiro seria a influência gravitacional de Júpiter sobre o satélite. Uma vez que a lua sempre mantém aproximadamente a mesma orientação com relação ao gigante gasoso, a ação das forças de maré criaria essas fendas formando padrões distintos. Contudo, observou-se que somente as fendas mais novas seguiam o padrão previsto. As fendas mais antigas, então, poderiam estar ligadas ao fato de a superfície de Europa estar se movendo mais rapidamente do que o interior da lua, o que seria possível caso houvesse um oceano líquido separando a superfície do manto rochoso (Hurford; Sarid; Greenberg, 2007). Imagens provenientes das sondas *Voyager* e *Galileo* revelaram evidências de subducção ocorrendo entre fragmentos da crosta congelada de Europa. Esse

processo já é conhecido na Terra e ocorre em regiões de convergência entre placas tectônicas, quando uma placa se desloca para baixo de outra. São regiões com elevada incidência de terremotos, vulcanismo e formação de montanhas. A existência dessas placas tornaria Europa o único corpo celeste conhecido a possuir placas tectônicas além da Terra (Figura 12.8) (JPL/Nasa, 2014).

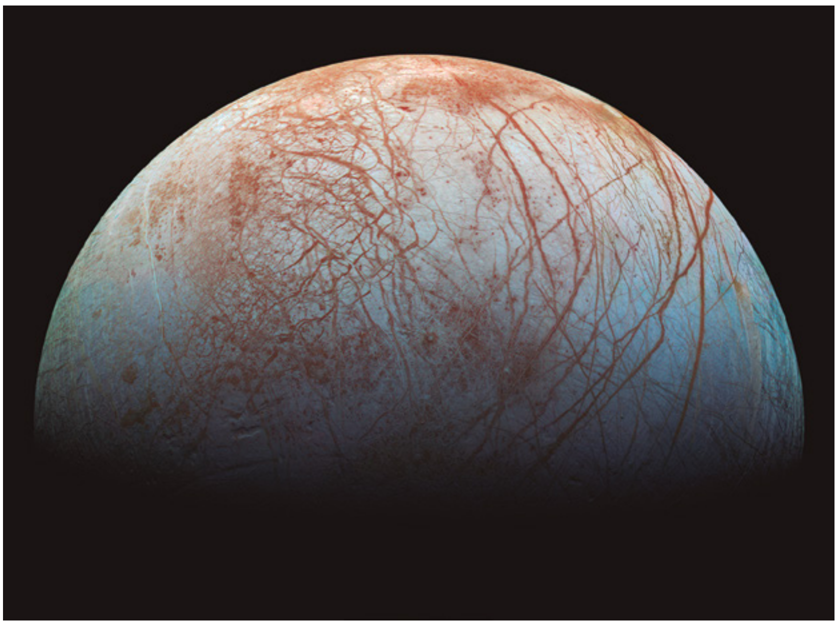


Figura 12.7. Superfície de Europa. A coloração foi adicionada sobre a foto original para destacar as linhas que cobrem a superfície da lua. Áreas em azul ou branco contêm gelo relativamente puro, enquanto regiões marrons contêm gelo com maior concentração de outros elementos. Fonte: Nasa/JPL-Caltech/SETI Institute

Quanto à sua atmosfera, observações realizadas pelo *Hubble* revelaram que Europa possui uma atmosfera fina, composta principalmente por oxigênio molecular (O_2) em sua camada interior e, em menor concentração, por hidrogênio molecular (H_2) em sua camada superior. Esse O_2 não é indicador de atividade biológica em Europa já que é formado pela radiólise da água na superfície da lua. A radiação ultravioleta do Sol e partículas carregadas da magnetosfera

de Júpiter (íons e elétrons) colidem com o gelo na superfície de Europa e quebram as moléculas de água em oxigênio e hidrogênio atômicos. O oxigênio, mais pesado, torna-se o principal componente da atmosfera da lua enquanto a maior parte do hidrogênio, por ser muito leve, escapa para o espaço. Observações de Europa também indicaram a presença de pequenas concentrações de espécies de sódio (Na) e potássio (K) na atmosfera, provavelmente formadas a partir de depósitos de sais na superfície (Smyth; Marconi, 2007).

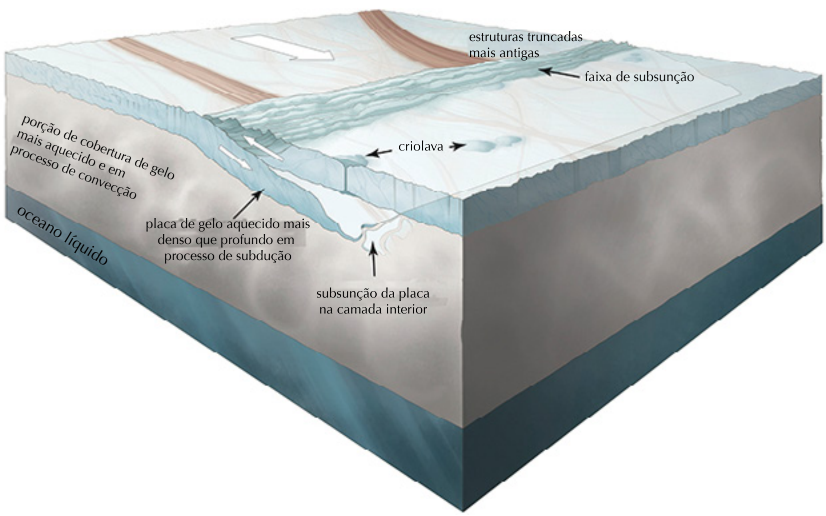


Figura 12.8. Representação do processo de subducção entre placas tectônicas em Europa. Fonte: Nasa/Noah Kroese, I.NK

Habitabilidade

A existência de um oceano global abaixo da crosta de gelo de Europa é consistente com as estruturas geológicas observadas na superfície da lua. Modelos termodinâmicos predizem um oceano abaixo dessa crosta que teria entre alguns quilômetros até dezenas de quilômetros de espessura, dependendo da taxa de aquecimento de maré entre o gelo e o manto rochoso. O oceano global de Europa pode ter persistido desde a formação da lua. Trata-se do elemento mais importante para a habitabilidade do satélite e seu

estudo é de grande interesse para determinar se a vida foi capaz de surgir e se manter em Europa.

Assumindo que Europa tenha uma origem condrítica e levando em conta a entrega de material do meio estelar, a lua teria uma ampla gama de compostos essenciais para a vida semelhante à da Terra. Atividade hidrotermal, se presente em Europa, transportaria esses elementos do manto de silicato para o oceano. Ainda assim, a disponibilidade desses elementos em quantidades biologicamente relevantes depende de fatores ainda pouco compreendidos, como a relação água-rocha durante as reações do material condrítico, a concentração salina do oceano e condições de pH, que influenciam a solubilidade desses elementos.

Os atuais modelos de Europa sugerem que a temperatura, pressão, pH e salinidade dos oceanos estão dentro dos limites capazes de suportar vida conhecida. A capacidade da vida terrestre de suportar uma faixa tão grande de condições deve-se à sua compartimentação (membrana celular) e capacidade de usar energia para reparar e manter as condições intracelulares diferentes do ambiente à sua volta. Assim, um fluxo de energia limitado tornaria a faixa de ambientes capazes de suportar a vida mais estreita. Embora fontes de energia já tenham sido identificadas em Europa, ainda existem muitas incertezas sobre como essa energia estaria disponível para eventuais formas de vida. Análises espectroscópicas da superfície de Europa revelaram a presença de diversas espécies oxidantes (O_2, H_2O_2, CO_2, SO_2, SO_4) geradas pela radiólise do gelo. Dado o contato direto entre a superfície e o oceano abaixo e as trocas de material entre eles, por tectonismo, plumas etc., seria possível que parte dessas espécies chegasse aos oceanos, o que seria um fator importante para a química oceânica e sua habitabilidade. Segundo a estimativa de Hand, Carlson e Chyba (2007), em um período de até 500 milhões de anos, intervalo de tempo escolhido, pois além desse período Europa seria mais ativa, e o fluxo de calor e material seriam muito mais intensos do que o observado atualmente, o oceano teria recebido entre 3×10^8 e 1×10^9 mols de O_2 por ano, taxa comparável ao fluxo

de 7×10^9 mols de O_2 por ano gerados pela fotólise da atmosfera superior da Terra.

A interação da água líquida com a rocha ultramáfica, que se acredita ocorrer no leito oceânico de Europa, produziria espécies redutivas, incluindo hidrogênio e formas reduzidas de carbono (metano), enxofre (sulfito de hidrogênio) e nitrogênio (amônia). Na Terra, formas de vida são capazes de catalisar uma série de reações biológicas empregando compostos que estariam presentes em Europa, gerando energia química capaz de sustentar seu crescimento. Contudo, o potencial biológico de Europa depende não só da existência desses compostos, mas da taxa com a qual essa energia pode ser acessada. Nesse quesito, diversas questões ainda devem ser respondidas (Pappalardo et al., 2013):

1. A entrega de espécies reduzidas depende da extensão e da natureza da reação entre a água e a rocha no leito oceânico. A salinidade do oceano de Europa, inferida por Hand, Carlson e Chyba (2007), sugere a ocorrência de extensivas reações da água com silicatos, mas aspectos importantes de tais reações, como a temperatura e pressão do leito oceânico, ainda precisam ser determinados, de modo que a concentração e disponibilidade de espécies reduzidas ainda são incertas;

2. Apesar da estimativa de Hand, Carlson e Chyba (2007) sobre taxa de entrega, mencionada anteriormente, de espécies oxidadas da superfície para o oceano, ainda é necessário estabelecer com precisão a relação entre o tempo de renovação da superfície de Europa e a espessura da camada de gelo com a taxa de entrega de espécies da superfície para o oceano;

3. Além das restrições impostas aos sistemas biológicos pelo fluxo de energia total, a forma como essa energia é entregue também é importante. Por exemplo, a entrega de fluidos redutores direcionada para uma região oxidada do oceano, como

ocorre em fontes hidrotermais no oceano terrestre, teria um potencial biológico muito diferente daquele de uma entrega difusa de espécies oxidantes – por exemplo, pelo derretimento do gelo da superfície, em um oceano redutor.

As informações atuais sobre Europa indicam que essa lua não só pode ser habitável atualmente, como provavelmente foi assim durante a maior parte da história do nosso Sistema Solar. Futuras observações, particularmente aquelas realizadas através de pousos na sua superfície, permitirão análises não apenas qualitativas, mas também quantitativas sobre o potencial habitável de Europa, especialmente quanto às fontes de energia disponíveis e evolução química do oceano.

Titã

Características gerais

Titã é a maior lua de Saturno e a segunda maior lua do Sistema Solar, atrás apenas de Ganimedes. Com diâmetro de aproximadamente 5.150 km, tem 1,5 vezes o tamanho da Lua terrestre e é 80% mais massiva. Trata-se do único satélite do Sistema Solar que tem atmosfera densa e evidência clara de corpos líquidos estáveis em sua superfície. Com densidade de 1,88 g/cm^3, acredita-se que Titã seja composta metade por água e metade por material rochoso.

Modelos teóricos da formação e evolução de Titã predizem que uma camada de água líquida poderia existir abaixo do gelo na superfície, desde que houvesse uma quantidade suficiente de amônia misturada à água, reduzindo sua temperatura de congelamento. A existência de amônia em Titã é suportada pelo modelo de agregação, pela abundância de amônia em cometas e pela sua presença em outros satélites de Saturno. Assim, Titã seria dividida, da superfície para o centro, em uma camada de gelo tipo I, uma camada líquida de água-amônia, uma camada de gelo sob alta pressão (tipo V e VI) e um núcleo rochoso (Figura 12.9) (Tobie et al., 2005).

Titã é a única conhecida a possuir uma atmosfera densa e rica em nitrogênio no Sistema Solar além da terrestre. A *Voyager*

mostrou que a atmosfera de Titã é mais densa do que a da Terra (pressão de 1,45 atm na superfície) e aproximadamente 1,19 vezes mais pesada. Dada sua opacidade, a atmosfera de Titã bloqueia a maior parte da luz visível do sol e de outras fontes, dificultando a observação da superfície da lua. Por isso, as primeiras observações diretas da superfície de Titã só foram obtidas em 2004 pela sonda *Cassini-Huygens*.



Figura 12.9. Modelo da possível estrutura interna de Titã. Para verificar a densidade estimada da lua, o núcleo de silicatos deve possuir 3.800 km de diâmetro, e a massa de água deve ser de aproximadamente 4,82 × 1.022 km. Fonte: Nasa/ A. Tavani

A atmosfera de Titã é composta por 98,4% de nitrogênio. O restante (1,6%) é principalmente metano (1,4%), hidrogênio (0,1-0,2%), traços de hidrocarbonetos como etano, acetileno, diacetileno, metilacetileno e propano, e outros gases como cianeto de hidrogênio, dióxido de carbono e cianoacetileno (Niemann et al., 2005). Teoriza-se que os hidrocarbonetos são formados na atmosfera superior de Titã através

da quebra do metano pela radiação ultravioleta solar. A permanência de metano na atmosfera, apesar da quebra pela luz solar, sugere que exista um reservatório desse hidrocarboneto dentro de Titã, que reporia o metano perdido na superfície e na atmosfera. Esse metano seria liberado do interior através de erupções de criovulcões. Com base em observações da *Cassini* e de observatórios na Terra, que identificaram nuvens brilhantes sobre Titã, Hueso e Sánchez-Lavega (2006) propuseram que a lua tem um ciclo do metano análogo ao ciclo da água na Terra (Figura 12.10). Os fortes ventos que assolam a superfície de Titã formariam nuvens densas de metano, que posteriormente voltariam para a superfície na forma de chuva. O acúmulo de metano líquido na superfície daria origem a lagos desse hidrocarboneto.

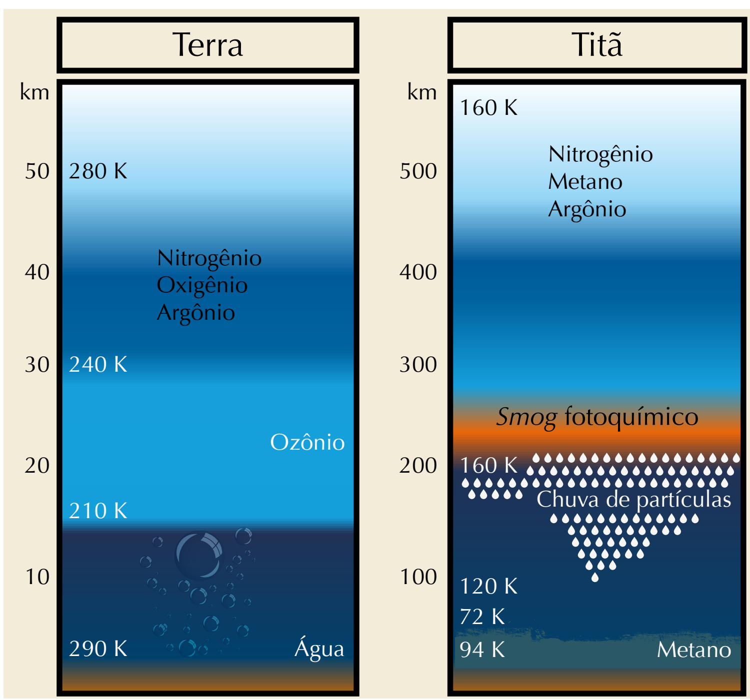


Figura 12.10. Paralelo entre o ciclo da água na Terra e do metano em Titã. Ambas as atmosferas são ricas em nitrogênio. Parte do metano presente na camada superior da atmosfera de Titã reage com luz ultravioleta, gerando uma camada de *smog* alaranjado, enquanto nas camadas inferiores precipita sobre a superfície. Fonte: IAG

A superfície de Titã é bastante complexa, tendo entre 100 milhões e 1 bilhão de anos. As imagens da *Cassini* revelaram regiões suaves e acidentadas que poderiam ter origem criovulcânica. Foram encontradas poucas crateras de impacto na superfície, e a maioria das crateras encontradas demonstrava sinais de erosão e modificação (Wood et al., 2010). Também foram identificadas extensas regiões de terreno claro e de terreno escuro. Originalmente imaginou-se que as regiões escuras, localizadas no equador de Titã, fossem lagos de hidrocarbonetos, mas observações recentes revelaram extensas planícies cobertas por dunas com até 100 m de altura e quilômetros de extensão. Na Terra, dunas desse tipo sempre estão alinhadas com a direção média dos ventos. No caso de Titã, contudo, observou-se que as dunas apontam para o leste, enquanto simulações climáticas indicaram que os ventos na superfície de Titã soprariam para o oeste. Simulações mais recentes sugerem que essas dunas seriam então formadas por fortes tempestades que ocorrem aproximadamente a cada 15 anos, quando Titã encontra-se no seu equinócio.

A areia de Titã seria formada quando o metano líquido, ao chover sobre a superfície, erodisse o leito rochoso. Alternativamente, a areia poderia ser formada pela agregação de compostos orgânicos formados por reações fotoquímicas na atmosfera. Constatou-se que as dunas contêm menos água congelada do que o restante de Titã e sua coloração marrom-escura seria relacionada ao fato de serem formadas pelos mesmos hidrocarbonetos da camada de *smog** da atmosfera superior. Caso o interior das dunas seja formado pelos mesmos materiais que sua superfície, a quantidade de material orgânico seria muito grande para ter sido gerada apenas pela erosão da superfície.

Talvez a característica mais interessante da superfície de Titã seja a presença de lagos formados por hidrocarbonetos líquidos únicos em nosso Sistema Solar. A possibilidade da existência desses lagos foi primeiro sugerida pelos dados obtidos das sondas *Voyager I* e *II*, que

* *Smog* designa, em termos genéricos, um nevoeiro contaminado por poluentes ou material orgânico, especialmente particulado, que pode interagir com a radiação solar e formar subprodutos.

mostraram que Titã tinha uma atmosfera espessa com temperatura e composição apropriadas para suportar esses lagos. Contudo, evidências diretas sugerindo a existência desses hidrocarbonetos líquidos na superfície – em bolsões isolados ou cobrindo grandes extensões – só foram obtidas em 1995 com dados do *Hubble* e de telescópios na Terra (Desmott; Sagan, 1995). Em 2004 a *Cassini* confirmou a segunda hipótese. O primeiro grande lago identificado foi batizado de Ontario Lacus, localizado no polo sul da lua, que se estende por cerca de 15.000 km^2 e é composto por metano e etano. Um novo voo da *Cassini*, em fevereiro de 2007, observou diversos lagos grandes na região polar norte, incluindo o Ligeia Mare, com 126.000 km^2 de área e o Kraken Mare, três vezes maior (Figura 12.11). Medidas feitas em 2009 e 2010 revelaram que o Ontario Lacus é bastante raso (profundidade média entre 0,4 e 3,2 m), já o Ligeia Mare tem profundidades de até 170 m.

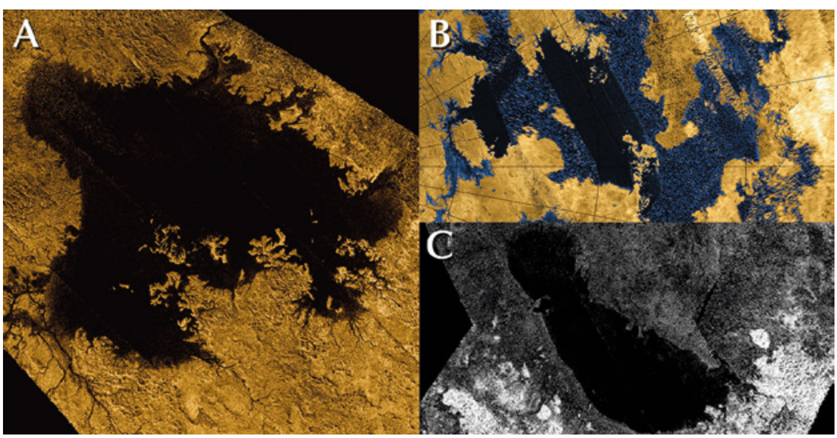


Figura 12.11. (A) Ligeia Mare; (B) Kraken Mare; (C) Ontario Lake. As imagens do Ligeia Mare e do Kraken Mare são representações coloridas com base nas imagens da *Cassini*. Fonte: Nasa/JPL-Caltech/ASI/Cornell - Nasa/JPL-Caltech/ASI/Cornell - Nasa/JPL-Caltech/Agenzia Spaziale Italiana/USGS

Estima-se que os lagos de Titã contenham centenas de vezes mais hidrocarbonetos líquidos e gás natural do que todas as reservas da Terra. Embora cada lago tenha uma composição distinta, estima-se que o composto mais comum seja etano (75%), seguido de metano (10%), propano (7%) e quantidades menores de butano, argônio e nitrogênio.

Habitabilidade

As informações obtidas até agora sobre o oceano de água no interior de Titã não sugerem que ele seja um bom candidato a conter vida. A camada de gelo sobre a lua parece ser bastante rígida, o que dificultaria as trocas de material entre a superfície e o oceano, e a camada de gelo tipo V e VI sobre a crosta isola o oceano do núcleo rochoso, sendo que se acredita que essa interface seja importante para o surgimento da vida. Ainda assim, o oceano aquoso não é o único ambiente de Titã onde poderíamos procurar formas de vida.

Caso a vida tenha surgido em Titã, o ambiente da lua provavelmente levaria os organismos a desenvolverem um maquinário metabólico muito diferente de qualquer um existente na Terra. Enquanto todas as formas de vida terrestre usam água como solvente, é concebível que a vida em Titã poderia utilizar hidrocarbonetos líquidos, como metano e etano. A reatividade de compostos orgânicos não é menor em solventes orgânicos do que em água. De fato, muitas enzimas terrestres catalisam reações em sítios ativos não aquosos. Além disso, hidrocarbonetos com grupos polares, como acetonitrila e hexano, são capazes de formar soluções de duas fases, o que torna concebível que uma separação líquido/líquido entre hidrocarbonetos seja capaz de criar a compartimentalização necessária para a organização de um micro-organismo. Gotículas de água, liquefeita através do impacto de asteroides, por exemplo, em um meio de hidrocarbonetos poderiam formar estruturas compartimentalizadas análogas a membranas, permitindo à vida conseguir o isolamento necessário do meio para se submeter à evolução darwiniana.

Por causa de sua reatividade, a água destrói espécies orgânicas hidroliticamente instáveis. Assim, uma forma de vida em um oceano de hidrocarbonetos estaria menos sujeita à hidrólise de suas biomoléculas. Para obter energia, essa forma de vida poderia utilizar o H_2 no lugar do O_2, reagindo-o com acetileno no lugar de glicose e produzindo metano no lugar de CO_2. Comparativamente, alguns organismos metanogênicos terrestres obtêm energia reagindo H_2 com CO_2, gerando metano e água (McKay; Smith, 2005).

Dessa forma, o ambiente de Titã, embora muito diferente do terrestre, possuiria os requisitos para a vida. Essa lua não tem um equilíbrio termodinâmico e possui moléculas contendo carbono e heteroátomos em abundância, meio líquido, e sua temperatura permitiria uma ampla gama de ligações covalentes e não covalentes. Acredita-se que ainda ofereça outros elementos favoráveis às reações necessárias para a vida, como metais e superfícies de contato. Se acreditarmos que a vida é uma propriedade inerente da reatividade química, então haveria grande possibilidade de a vida ter se formado em Titã.

Encélado

Características gerais

Encélado é a sexta maior lua de Saturno. Com 500 km de diâmetro é aproximadamente 10 vezes menor do que Titã. Tendo massa de aproximadamente $1,08 \times 10^{20}$ kg e densidade de 1,61 g/cm^3 (Porco et al., 2006), estima-se que Encélado seja formada por água, silicatos e ferro, sendo diferenciada com um núcleo rochoso, envolto por um oceano líquido e uma crosta de gelo em sua superfície (Figura 12.12).

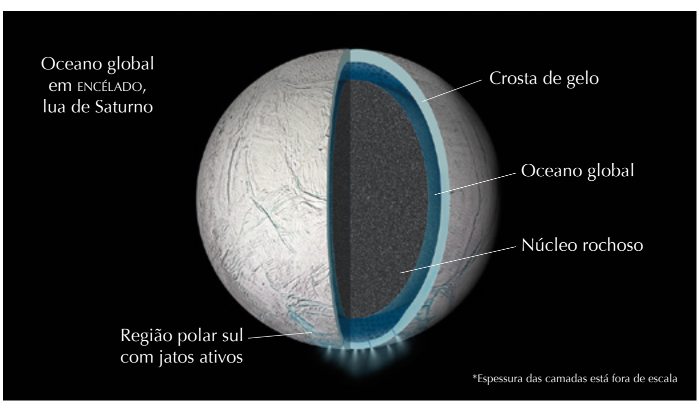


Figura 12.12. Representação esquemática do interior de Encélado com um oceano líquido global entre o núcleo rochoso e a crosta congelada. Fonte: Nasa/JPL-Caltech

Pouco se sabia sobre Encélado até o começo da década de 1980, quando as espaçonaves *Voyager* I e II fizeram os primeiros

voos próximos a essa lua. Imagens obtidas da *Voyager II* revelaram diversos tipos de terrenos distintos na superfície de Encélado, incluindo regiões ricas em crateras, fissuras, escarpas, regiões de terreno plano e recente (algumas centenas de milhões de anos), e regiões marcadas por linhas e espinhaços, estes últimos frequentemente encontrados na borda dos terrenos recentes.

Novas imagens, obtidas pela *Cassini* em 2005, revelaram mais detalhes sobre a superfície de Encélado. Observou-se que as planícies suaves têm poucas crateras e numerosas pequenas escarpas. Já no terreno mais antigo, rico em crateras, foram encontradas diversas fraturas, indicando que a superfície foi submetida a deformações extensivas desde que as crateras foram formadas. Diversas regiões de terreno novo, quase livres de crateras e marcadas pela presença de grandes blocos de gelo foram observadas em regiões ainda não mapeadas no polo sul da lua (Figura 12.13). A *Cassini* também confirmou a emissão de plumas de vapor de água e gelo no polo sul de Encélado (Porco et al., 2006).

O primeiro voo da *Cassini* sobre Encélado, em 2005, mostrou uma atmosfera tênue ao redor de Encélado e confirmou que a superfície da lua era formada principalmente por água, compostos orgânicos simples e CO_2. O gelo na superfície de Encélado possui albedo de 1,4, fazendo da lua um dos objetos mais reflexivos do Sistema Solar. Por refletir a maior parte da luz, a superfície de Encélado é mais fria do que a dos demais satélites de Saturno, atingindo –198°C.

As plumas de Encélado e a formação do anel E de Saturno

O anel E, situado entre as órbitas de Mimas e Titã é o segundo anel mais externo de Saturno. Trata-se de um anel extremamente largo e difuso, consistindo de partículas microscópicas (0,3 a 3 μm) de gelo, silicatos, dióxido de carbono e amônia (Figura 12.14).

Em um voo por Encélado realizado em 2005, a *Cassini* atravessou uma nuvem de gás, detectando um aumento significativo de partículas 10 minutos antes e 10 minutos depois de sua passagem. Ao mesmo tempo, o espectrômetro de íons e massa da sonda detectou a presença de água, dióxido de carbono, nitrogênio e

metano (Waite et al., 2006). Também foi observado que o menor diâmetro e a maior concentração de material particulado no anel E encontra-se na região ao redor de Encélado, e que o anel vai se tornando mais grosso e menos denso à medida que se afasta da lua (Hedman et al., 2012). Com base na concentração e composição do material particulado concluiu-se que Encélado é a fonte do material que forma o anel E, expelido da lua por plumas criovulcânicas, observadas no hemisfério sul da lua. Observações adicionais realizadas por um novo voo da *Cassini* em 2008 revelaram traços de outros compostos químicos nas plumas de Encélado, como metano, propano, acetileno e formaldeído. A composição das plumas de Encélado é similar às da maioria dos cometas (Nasa, 2015).

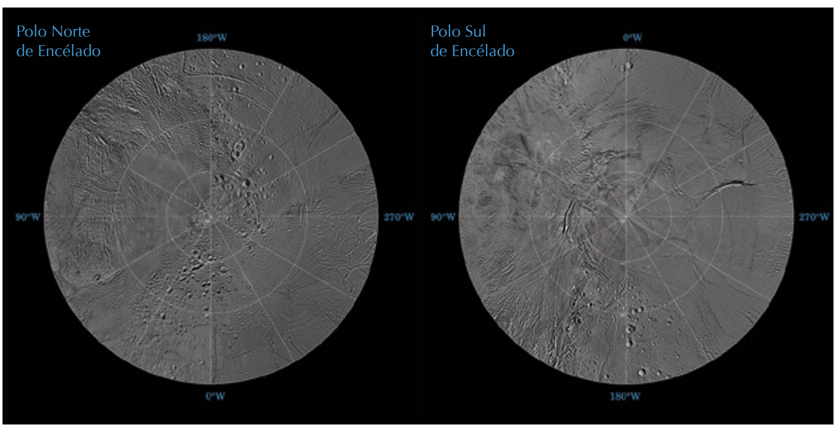


Figura 12.13. Hemisférios norte (esquerda) e sul (direita) de Encélado. O terreno norte é marcado por crateras, sendo o mais antigo da lua. Embora as crateras se estendam até o sul, lá elas se tornam menos pronunciadas, sendo substituídas por terreno mais novo marcado por fissuras. Fonte: Nasa/JPL/Space Science Institute

Os dados de espectrometria de massa e imagem da *Cassini* sugerem que as plumas que emanam do hemisfério sul de Encélado se originam de câmaras pressurizadas abaixo da superfície, similares aos gêiseres observados na Terra (Porco et al., 2006). A intensidade das erupções varia significativamente de acordo com a posição de Encélado em sua órbita, sendo mais intensas quando a lua está mais distante de Saturno e menos intensa quando

está mais próxima. Isso é consistente com modelos geofísicos que predizem que as fissuras do hemisfério sul estariam sob compressão quando a lua estivesse mais próxima de Saturno, permanecendo fechadas, e sob tensão quando estivesse mais distante, abrindo-se.

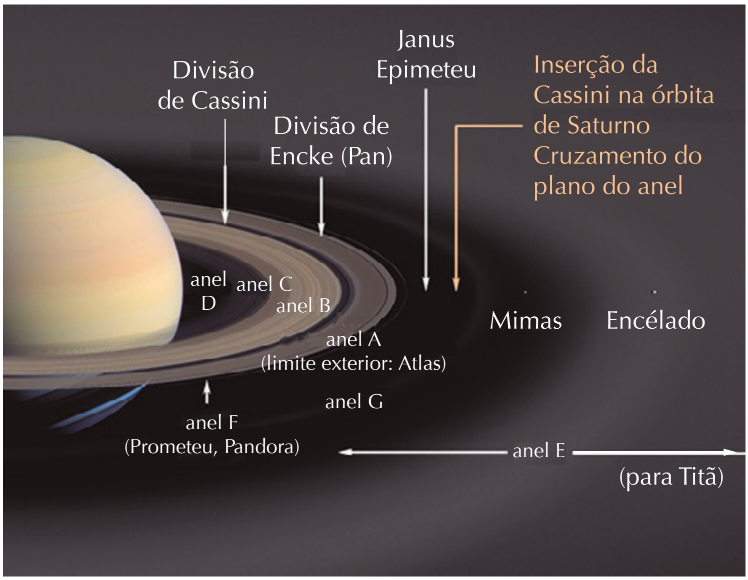


Figura 12.14. Representação conceitual dos anéis de Saturno. Encélado, localizado no anel E, seria a principal fonte de material para sua formação. Fonte: Nasa/JPL, 2005

Habitabilidade

Com uma superfície desprovida de água líquida, a existência de vida em Encélado estaria condicionada à presença de água líquida em seu interior. Desde 2005 há evidências de água líquida no interior da lua, obtida através da análise das plumas. Originalmente, imaginou-se que a água líquida no interior de Encélado estaria concentrada em um oceano abaixo do hemisfério sul, um modelo distinto do imaginado para Europa e Ganimedes, cujos oceanos se estenderiam por todo o globo. A conclusão de que Encélado possui um oceano global veio da observação das oscilações presentes no movimento orbital da lua em volta de Saturno, que só poderiam ser

explicadas se a camada de gelo da superfície estivesse separada do núcleo rochoso por uma camada de líquido (Saturn/Nasa, 2015).

Diferente de outras luas geladas de interesse para a astrobiologia, as amostras do oceano de Encélado são facilmente acessíveis através das plumas. Coletar material proveniente do oceano diretamente da atmosfera, dispensando missões de pouso e perfuração do gelo da superfície, como se planeja fazer em Europa no futuro, torna a pesquisa de vida em Encélado mais atrativa e economicamente viável com a tecnologia espacial atual (McKay et al., 2014).

A salinidade do oceano de Encélado, determinada através da análise das plumas, seria comparável à dos oceanos terrestres, um indício de que estaria em contato direto com a rocha (Postberg et al., 2011). Havendo atividade geotérmica, gerada pela energia do aquecimento de maré causado pela interação gravitacional com Saturno, seria concebível encontrar espécies redutoras em seu oceano, necessárias para a ocorrência de processos biológicos. H_2 e CO_2, espécies encontradas em fluxos geotérmicos terrestres, foram encontrados nas plumas de Encélado. Outros compostos encontrados com potencial biológico foram CH_4 e HCN, moléculas orgânicas que podem reagir para originar cadeias orgânicas maiores, necessárias para a síntese de biomoléculas (Waite et al., 2009). O nitrogênio, importante para a formação de aminoácidos e outras biomoléculas, também foi detectado. Contudo, alguns átomos importantes, como potássio e enxofre, ainda não foram encontrados, embora sua presença no oceano de Encélado ainda não possa ser completamente descartada.

Uma questão importante e ainda não respondida sobre a astrobiologia de Encélado é há quanto tempo as condições atuais de habilidade persistem na lua. Shapiro e Schulze-Makuch (2009) classificaram Encélado abaixo de Europa e Marte em sua escala de probabilidade de vida, em parte por considerarem que a origem da vida seria improvável nesta lua por causa de um período habitável curto. Ou seja, não teria havido tempo hábil para a vida se formar lá como ocorreu na Terra. Por estar muito distante do nosso planeta, a chance de formas de vida terrestres terem chegado até lá (panspermia) é muito remota (Worth; Sigurdsson; House, 2013), o que significaria que qualquer

forma de vida encontrada lá teria de ter se originado na própria lua. Embora os primeiros indícios de formas de vida na Terra indiquem que tenha surgido por volta de 3,5 bilhões de anos atrás, a inexistência de fósseis anteriores a este período poderia ser resultado apenas do fato de não haver mais terreno sedimentar tão antigo preservado. Assim, a hipótese de que a vida possa surgir em um período menor de tempo não poderia ser completamente descartada (McKay et al., 2014)

Exploração do Sistema Joviano – Jupiter Icy Moons Explorer (Juice)

Em 2012 a Agência Espacial Europeia aprovou a missão Jupiter Icy Moons Explorer (Juice) como a primeira missão dentro do seu programa de exploração espacial Cosmic View Program, a ser realizado entre 2015 e 2025.

O foco da Juice será caracterizar as condições que podem ter levado ao surgimento de ambientes habitáveis nos satélites gelados jovianos. Embora Europa e Calisto estejam inclusas no cronograma da missão, dará ênfase ao estudo de Ganimedes, escolhida como modelo para o estudo da natureza e da habitabilidade de mundos gelados e por sua magnetosfera única e interação com os demais corpos do Sistema Joviano. A Juice deverá determinar as características dos oceanos líquidos abaixo das superfícies das luas geladas, estudará a evolução química desses satélites e suas fontes de energia, além de investigar processos diversos dentro do Sistema Joviano que possam influenciar a habitabilidade das luas geladas (ESA/SRE, 2014).

De acordo com o cronograma oficial da missão, a Juice deve ser lançada em setembro de 2022 com a espaçonave *Ariane 5*. Empregará uma estratégia de assistência gravitacional Terra-Vênus-Terra-Terra para chegar a Júpiter em 2030. Se o lançamento não puder ser realizado em 2022, haverá outras duas oportunidades em 2023 e 2024. Uma vez na órbita de Júpiter, a Juice fará uma série de voos por Calisto e Europa durante dois anos, até se transferir para Ganimedes, onde a espaçonave permanecerá por um ano até cair na superfície. A Tabela 12.3 a seguir descreve com detalhes o cronograma da missão e seus objetivos de estudo em cada etapa. É importante ressaltar que

Tabela 12.3. Cronograma, instrumentos e objetivos da missão Juice

Exploração da zona habitável: Ganimedes, Europa e Calisto	
Ganimedes como objeto planetário e habitat possível	Caracterizar a extensão do oceano e sua relação com a região interior mais profunda
	Caracterizar a cobertura de gelo
	Determinar a composição global, distribuição e evolução dos materiais da superfície
	Entender a formação das estruturas da superfície e buscar atividades recentes ou remotas
	Caracterizar o ambiente local e sua interação com a magnetosfera joviana
Zonas de atividade recentes de Europa	Determinar a composição de outros materiais além do gelo, especialmente em relação à habitabilidade
	Buscar água líquida abaixo dos principais locais de atividade
	Estudar os processos ativos recentes
Calisto como um remanescente do antigo Sistema Joviano	Caracterizar as camadas exteriores, incluindo o oceano
	Determinar a composição de outros materiais além do gelo
	Estudar atividades do passado da lua
Explorar o Sistema Joviano como um modelo de gigantes gasosos	
A atmosfera joviana	Caracterizar a dinâmica e a circulação atmosférica
	Caracterizar a composição e a química atmosférica
	Caracterizar a estrutura atmosférica vertical
A magnetosfera joviana	Caracterizar a magnetosfera como um rotor magnético veloz
	Caracterizar a magnetosfera como um acelerador gigante
	Compreender as luas como fontes e depósitos de plasma magnetosférico
Os satélites jovianos e os sistemas de anéis	Estudar a atividade de Io e a composição da superfície
	Estudar as principais características dos anéis e satélites menores

Fonte: Adaptado de ESA/SRE, 2014

embora não haja planos de realizar voos por Io, essa lua também será estudada durante a passagem por Júpiter (ESA/SRE, 2014).

Conclusão

Embora possuam uma classificação comum, os satélites denominados luas geladas têm características distintas e devem ser estudados sempre levando isso em consideração. Entre eles encontra-se Io, um dos corpos com menos água em nosso Sistema Solar e intenso vulcanismo, onde a vida como a conhecemos na Terra seria extremamente difícil, e também Ganimedes e Europa, dois dos ambientes com maior possibilidade de conter vida fora da Terra e cujo estudo ajudaria a compreender melhor como a vida surgiu em nosso próprio planeta. Dessa forma, ao planejar missões para estudar alguma das luas geladas, é imprescindível definir quais serão os objetos de estudo e, no caso da busca por vida, qual tipo de vida está sendo procurado.

Referências

AGNOR, C. B.; HAMILTON, D. P. Neptune's capture of its moon Triton in a binary planet gravitational encounter. *Nature*, v. 441, p. 192-194, 2006.

ANDERSON, J. D. et al. Io's gravity field and interior structure. *Journal of Geophysical Research*, v. 106, p. 32963-32969, 2001.

BROWN, R. H. et al. Triton's global heat budget. *Science*, v. 251, p. 1465-1467, 1991.

CANUP, R. M.; WARD, W. R. Formation of the gallilean satellites: conditions of accretions. *The Astronomical Journal*, v. 124, n. 6, p. 3404-3423, 2002.

ĆUK, M.; GLADMAN, B. J. Constraints on the orbital evolution of Triton. *Astrophysical Journal*, v. 626, p. 113-116, 2005.

DERMOTT, S. F.; SAGAN, C. Tidal effects of disconnectes hydrocarbon seas of Titan. *Nature*, v. 374, p. 238-240, 1995.

ESA/SRE – EUROPEAN SPACE AGENCY. Jupiter Icy Moons Explorer exploring the emergence of habitable worlds around gas giants. Disponível em: http://sci2.esa.int/cosmic-vision/JUICE_Yellow_Book_Issue1.pdf. Acesso em: 10 jun. 2015.

FIGUEREDO, P. H.; GREELEY, R. Resurfacing history of Europa from pole--to-pole geological mapping. *Icarus*, v. 167, p. 287-312, 2004.

GAEMAN, J.; HIER-MAJUMDER, S.; ROBERTS, J. H. Sustainability of a subsurface ocean within Triton's interior. *Icarus*, v. 220, p. 339-347, 2012.

HAND, K. P.; CARLSON, R. W.; CHYBA, C. F. Energy, chemical disequilibrium and geological constraints on Europa. *Astrobiology*, v. 7, p. 1066-1022, 2007.

HAUCK, S. A.; AURNOU, J. M.; DOMBARD, A. J. Sulfur's impact on core evolution and magnetic field generation on Ganymede. *Journal of Geophysical Research*, v. 111, n. E9, 2006.

HEDMAN, M. M. et al. The three-dimensional structure of Saturn's E ring. *Icarus*, v. 217, p. 322-338, 2012.

HEDMAN, M. M. et al. An observed correlation between plume activity and tidal stresses on Enceladus. *Nature*, v. 500, p. 182-184, 2013.

HUESO, R.; SÁNCHEZ-LAVEGA, A. Methane storms on Saturn's moon Titan. *Nature*, v. 44, p. 428-431, 2006.

HURFORD, T. A.; SARID, A. R.; GREENBERG, R. Cycloidal cracks on Europa: improved modeling and non-synchronous rotation implications. *Icarus*, v. 186, p. 218-233, 2007.

IRWIN, L. N.; SCHULZE-MAKUCH, D. Assessing the plausibility of life on other worlds. *Astrobiology*, v. 1, n. 2, p.143-160, 2001.

KARGEL, J. S. et al. Europa's crust and ocean: origin, composition and the prospects for life. *Icarus*, v. 148, p. 226-265, 2000.

Lipps, J. H. et al. Astrobiology of Jupiter's Icy Moons. *Instruments, Methods and Missions for Astrobiology*, VIII, v. 5555, p. 78-92, 2004.

Mckay, C. P. et al. Follow the plume: the habitability of Enceladus. *Astrobiology*, v. 14, p. 352-355, 2014.

Mckay, C. P.; Smith, H. D. Possibilities for methanogenic life in liquid methane on the surface of Titan. *Icarus*, v. 178, p. 274-276, 2005.

Mckinnon, W. B.; Leith, A. C. Gas drag and the orbital evolution of a captured Triton. *Icarus*, v. 118, p. 392-413, 1995.

Mckinnon, W. B.; Kirk, R. L. Encyclopedia of the Solar System. *Academic Press*, p. 483-502, 2007.

Mckinnon, W. B. On convection in ice I shells of outer Solar System bodies, with detailed application to Callisto. *Icarus*, v. 183, n. 2, p. 435-450, 2006.

Mosqueira, I.; Estrada, P. R. Formation of the regular satellites of giant planets in an extended gaseous nebula I: subnebula model and accretion of satellites. *Icarus*, v. 163, n. 1, p. 198-231, 2003.

Nasa. Cassini finds global ocean in Saturn's moon Enceladus. Disponível em: http://saturn.jpl.nasa.gov/news/newsreleases/newsrelease20150915/. Acesso em: 15 set. 2015.

Nasa. Cassini tastes organic material at Saturn's geyser moon. Disponível em: http://www.nasa.gov/mission_pages/cassini/media/cassini-20080326.html. Acesso em: 20 set. 2015.

Nasa/JPL. Scientists find evidence of diving tectonic plates on Europa. Disponível em: http://www.jpl.nasa.gov/news/news.php?release=2014-300. Acesso em: 17 set. 2015.

Niemann, H. B. et al. The abundance of constituents of Titan's atmosphere from GCMS instrument on the Huygens probe. *Nature*, v. 438, p. 779-784, 2005.

Pappalardo, R. T. et al. Science potential for a Europa lander. *Astrobiology*, v. 13, p. 740-773, 2013.

PARANICAS, C.; PATERSON, W. R. Energetic particles observations near Ganymede. *Journal of Geophysical Research*, v. 104, n. A8, p. 17459-17469, 1999.

PORCO, C. C. et al. Cassini observes the active south pole of Enceladus. *Science*, v. 311, p. 1419-1422, 2006.

POSTBERG, F. et al. A salt-water reservoir as the source of a compositionally stratified plume on Enceladus. *Nature*, v. 474, p. 620-622, 2011.

ROBERTS, J. H.; NIMMO, F. Tidal heating and long term stability of a subsurface ocean in Enceladus. *Icarus*, v. 194, p. 675-689, 2008.

ROSS, M. N.; SCHUBERT, G. The coupled orbital and thermal evolution of Triton. *Geophysical Research Letters*, v. 17, p. 1749-1752, 1990.

SAUR, J. et al. The search for a subsurface ocean in Ganymede with Hubble Space Telescope observations of its auroral ovals. *Journal of Geophysical Research*, v. 120, p. 1715-1737, 2015.

SCHULZE-MAKUCH, D. Io: Is life possible between fire and ice? *Journal of Cosmology*, v. 5, p. 912-919, 2010.

SCHUBERT, J. et al. Interior composition, structure, and dynamics of the Galilean satellites. In: Bagenal. F. et al. *Jupiter:* the Planet, Satellites, and Magnetosphere. Cambridge: Cambridge University Press, p. 281-306, 2004.

SCIENCEDAILY. Nasa's Galileo reveals magma 'ocean' beneath surface of Jupiter's moon. *ScienceDaily*, University of California, Los Angeles, 12 maio 2011. Disponível em: www.sciencedaily.com/releases/2011/05/110512150723.htm. Acesso em: 10 jun. 2015.

SHAPIRO, R. S.; SCHULZE-MAKUCH, D. The search for alien life in our solar system: strategies and priorities. *Astrobiology*, v. 9, p. 335-343, 2009.

SHOWMAN, A. P.; MALHOTRA, R. The Galilean satellites. *Science*, v. 286, p. 77-84, 1999.

______. Tidal evolution into the Laplace resonance and the resurfacing of Ganymede. *Icarus*, v. 127, n. 1, p. 93-111, 1997.

SMYTH, W. H.; MARCONI, M. L. Processes shaping Galilean Satellite atmospheres from the surface to the magnetosphere. *Workshop on ices, oceans and fire: satellites of the Outer Solar System*, Colorado, 2007.

TOBIE, G. et al. Titan's internal structure inferred from a coupled thermal-orbital model. *Icarus*, v. 175, p. 496-502, 2005.

VOLWERK, M. et al. Probing Ganymede's magnetosphere with field line resonances. *Journal of Geophysical Research*, v. 104, n. A7, p.14729-14738, 1999.

WAITE, J. H. et al. Cassini ion and neutral mass spectrometer: Enceladus plume composition and structure. *Science*, v. 311, p. 1419-22, 2006.

WAITE, J. H. et al. Liquid water on Enceladus from observations of ammonia and 40A in the plume. *Nature*, v. 460, p. 487-490, 2009.

WOOD, C. A. et al. Impact craters on Titan. *Icarus*, v. 206, p. 334-344, 2010.

WORTH, R. J.; SIGURDSSON, S.; HOUSE, C. H. Seeding life on the moons of the outer planets via lithopanspermia. *Astrobiology*, v. 13, p. 1155-1165, 2013.

BUSCA DE VIDA ALÉM DO SISTEMA SOLAR

Capítulo 13

Douglas Galante, Rosimar Alves do Rosário
e Marcio G. B. de Avellar

A busca por vida extraterrestre pode se estender muito além de nosso Sistema Solar. Apenas na Via Láctea, há centenas de bilhões de estrelas, cada uma podendo ter um sistema planetário próprio. Assim sendo, a probabilidade de que alguns desses inumeráveis mundos tenham condições que os façam habitáveis (ao menos, pelo que se conhece com base na vida na Terra) pode ser muito grande. A partir dessa perspectiva, muitos astrônomos se voltaram para um dos maiores desafios científicos da atualidade: detectar planetas orbitando outras estrelas, distantes muitos anos-luz da Terra, os chamados exoplanetas, para entender suas condições ambientais e procurar por sinais de vida.

Há séculos, a astronomia tem estudado a distribuição de estrelas em nosso Universo, pois elas são relativamente simples de detectar, uma vez que produzem luz própria devido às reações nucleares que ocorrem em seu interior. Dessa maneira, podem ser

observadas a olho nu nos comprimentos de onda visíveis aos humanos e por telescópios em uma ampla faixa espectral, do rádio aos raios X. Planetas, ao contrário, não têm massa (e, portanto, força gravitacional) suficiente para dar início às reações nucleares como as estrelas. Assim, são muito mais difíceis de observar, uma vez que apenas refletem uma fração da luz de suas estrelas-mãe. Pelo mesmo motivo, até poucos anos atrás não conhecíamos muitos planetas fora do Sistema Solar e nem sequer sabíamos ao certo se planetas eram objetos comuns no Universo, ou um fenômeno raro de nossa vizinhança.

Essa visão está mudando nas últimas décadas com a descoberta de quase mil exoplanetas, um número que deve continuar crescendo graças aos rápidos avanços na tecnologia de detecção.

A detecção dos planetas é apenas o primeiro passo de um longo caminho até a descoberta de vida. Ela deve ser seguida pelo estudo das características do planeta, começando pelas mais simples de serem medidas, como tamanho, massa e distância da estrela, para depois seguirmos para as mais complexas, como temperatura, presença de oceanos e atmosfera, composição química e, possivelmente, a alteração do planeta pela presença de vida, de uma maneira que possamos medir.

No estágio atual da tecnologia de detecção, somos capazes de medir as características mais simples dos planetas, e apenas recentemente começamos a desvendar sua composição química e verificar a presença de atmosferas, mas ainda um longo trabalho é necessário para podermos dizer com segurança se existe ou não alguma forma de vida fora do Sistema Solar.

Primeiro passo: detecção

Como planetas não produzem luz, apenas refletindo a proveniente de suas estrelas hospedeiras, sua detecção é muito difícil. Por exemplo, nos comprimentos de onda da luz visível (ou seja, da cor vermelha até o violeta), a luz que chega até nós de uma estrela típica é cerca de 1 bilhão de vezes mais intensa que a refletida por um planeta em sua órbita. Como, do ponto de vista astronômico,

o planeta está muito perto da estrela, sua luz acaba sendo ofuscada. É como tentarmos enxergar um pequeno mosquito voando ao redor de uma potente lâmpada; aos nossos olhos ele se torna praticamente invisível. Apenas recentemente esse problema começou a ser resolvido, usando técnicas alternativas e indiretas para a detecção do planeta. A possibilidade de imagens diretas de outros mundos, além do Sistema Solar, ainda demorará mais tempo, necessitando mais desenvolvimento tecnológico, em especial de telescópios espaciais mais potentes.

Velocidade radial

É o método que tem descoberto mais exoplanetas até o momento e se baseia em uma medida indireta dos efeitos do planeta sobre a estrela. Em vez de tentarmos enxergar diretamente o planeta, podemos perceber sua presença pela forma como sua gravidade e movimento alteram a velocidade da estrela (ou estrelas, se for um sistema múltiplo).

Essa técnica é chamada de “método da velocidade radial”, pois o que medimos são variações na velocidade com que a estrela se move em relação ao observador na Terra. As estrelas, como o próprio Sol, não estão paradas no centro de seus sistemas planetários (como seria em um modelo absolutamente heliocêntrico); na verdade, todos os corpos de um sistema planetário orbitam o centro de massa daquele conjunto de corpos, e esse ponto no espaço muitas vezes não coincide com a posição geométrica da estrela. Portanto, estrelas também descrevem órbitas elípticas em seus sistemas (com um raio orbital normalmente muito pequeno, claro), ou seja, observando-as da Terra, elas se moveriam muito pouco, de um lado para o outro e de frente para trás (Figura 13.1).

Usando métodos espectroscópicos de grande precisão, pode-se medir a velocidade com que a estrela se aproxima e se afasta de nós nesse movimento elíptico causado pela presença dos planetas. Essa medida é possível devido ao efeito Doppler, no qual a radiação tem seus comprimentos de onda comprimidos quando a fonte (estrela) se aproxima do observador (nós), e estendido

quando ela se afasta, de maneira muito parecida com um radar de velocidade usado no controle de tráfego.

Esses efeitos são chamados de desvio para o vermelho (ou *redshift*, quando a luz é deslocada para comprimentos de onda maior – mais próximos do vermelho) e desvio para o azul (ou *blueshift*, quando a luz é deslocada para comprimentos de onda menor – mais próximos do azul). Medindo a intensidade da compressão do comprimento de onda da luz (ou o aumento de sua frequência, o que é equivalente), é possível saber a velocidade com que a fonte dessa luz se aproxima e se afasta de nós.

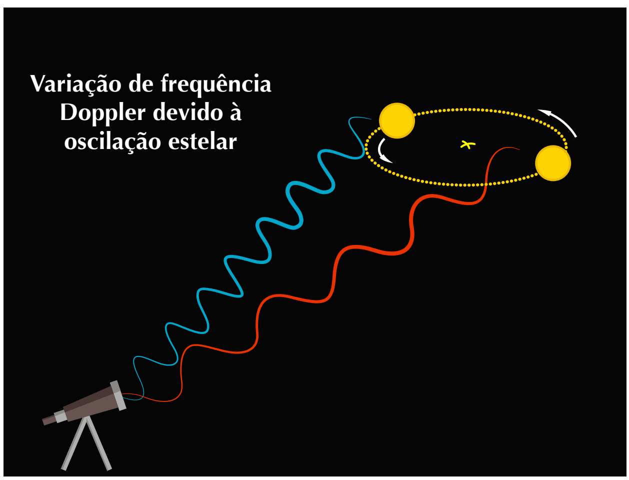


Figura 13.1. Detecção da oscilação da estrela causada pela presença de um ou mais planetas por efeito Doppler. Fonte: IAG

Os instrumentos de maior precisão do mundo, como o espectrômetro Harps (High Accuracy Radial Velocity Planet Searcher) são capazes de medir a velocidade de oscilação de uma estrela a anos-luz de distância com precisão de cerca de 1m/s, a mesma velocidade de uma pessoa caminhando, o que é impressionante.

Esse efeito é sutil, mas pode ser observado no espectro de emissão atômico das estrelas, que é gerado pela presença de diferentes elementos químicos misturados em seu gás. Conforme esses átomos são aquecidos, eles emitem radiação com comprimentos

de onda muito específicos, que são conhecidos por experimentos em laboratório. O deslocamento sutil dessas linhas com o tempo é proporcional à velocidade das estrelas, e esta, por sua vez, depende das características do(s) planeta(s) (massa, velocidade e raio orbital etc). Dessa maneira, exoplanetas podem ser detectados e algumas de suas características desvendadas.

Trânsitos

A segunda forma mais eficiente de detecção, até o momento, é por meio de trânsitos planetários, também chamados de eclipses ou ocultamentos. Observando um sistema planetário distante, às vezes as órbitas estarão perpendiculares a nossa observação, ou seja, os planetas se movimentariam em torno da estrela, mas nunca à frente dela, e às vezes as órbitas podem estar no mesmo plano de observação nosso, ou seja, em algum momento elas cruzariam a reta entre a estrela e o observador, criando um efeito de eclipse.

Essa distribuição das órbitas dos sistemas de exoplanetas deve ser completamente aleatória, portanto é de se esperar que encontremos todos os casos possíveis pelo Universo, de planetas completamente alinhados até completamente perpendiculares a nós. A técnica de trânsito só é possível nos casos em que o planeta cruza à frente da estrela, mesmo que um pouco fora de alinhamento, o que cria um limite para o número de observações por essa técnica, que pode ser uma das mais importantes para o futuro, para a caracterização das atmosferas dos exoplanetas.

Ao cruzar a frente da estrela, o planeta causa uma diminuição de seu brilho (Figura 13.2). Considerando que os planetas são muito pequenos em comparação com o tamanho da estrela, e porque estão longe, a quantidade de luz da estrela que é bloqueada é muito pequena, no geral inferior a 1% do total emitido. Ao contrário do que acontece em um evento de eclipse total solar, quando a Lua bloqueia completamente o disco do Sol, o evento de trânsito é similar ao que ocorreu quando Mercúrio passou na frente de nossa estrela em novembro de 2006 – praticamente

imperceptível a olho nu. Ou seja, para detectar a diminuição do brilho de estrelas causada por trânsito de exoplanetas é necessário que a estrela seja observada por longos períodos (para que sejam confirmados vários eventos de trânsito) com um telescópio otimizado para realizar medidas fotométricas (quantidade de luz emitida pela estrela) de alta precisão.

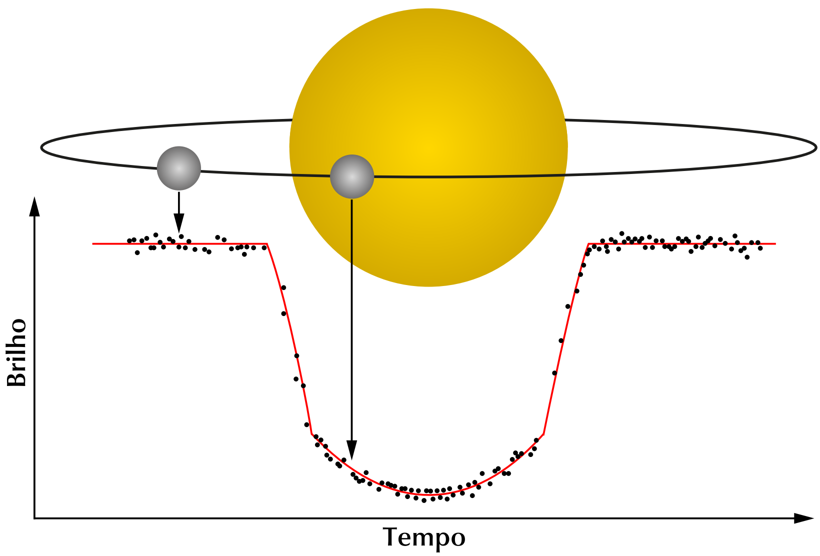


Figura 13.2. Detecção de exoplaneta pela diminuição da luminosidade da estrela durante o momento de trânsito. Fonte: IAG

As medidas de trânsito fornecem informações sobre a órbita e o tamanho do planeta. Além disso, durante o evento de trânsito, pode ser possível observar também a atmosfera do planeta, caso ele tenha uma, o que será discutido com mais detalhe adiante.

Astrometria

A Astrometria é uma das mais antigas áreas da astronomia, que se preocupa em medir a posição dos corpos celestes, para diferentes objetivos. No passado, foi usada para compreender que a Terra não estava no centro do Universo e dar provas à teoria

heliocêntrica de Copérnico. Atualmente, por exemplo, permitiu inferir que há um buraco negro no centro de nossa galáxia pela determinação do movimento das estrelas ao seu redor.

Como já foi comentado na seção sobre a técnica de velocidade radial, a presença de planetas ao redor de uma estrela faz que ela tenha um movimento próprio ao redor do centro de massa do sistema. Quanto maior o planeta e mais próximo da estrela ele estiver, mais pronunciado será esse movimento (Figura 13.3).

Para se ter uma ideia da dificuldade de realizar essa medida, no Sistema Solar, por exemplo, o Sol gira em torno de um centro de massa em uma órbita com um raio aproximado de 700 mil quilômetros, um efeito causado principalmente pela presença do maior planeta do Sistema Solar, Júpiter. Pode parecer muito, mas não em escalas astronômicas.

O próprio diâmetro do Sol é o dobro disso, cerca de 1,4 milhão de quilômetros. Dessa maneira, o Sol apenas "oscila" em torno do centro de massa, e é essa oscilação que queremos detectar. Se pensarmos que nosso intuito é observar uma oscilação da mesma amplitude que a do Sol a distância da estrela mais próxima (cerca de 4,5 anos-luz), teríamos de usar um telescópio com uma resolução angular (o menor ângulo que o telescópio consegue separar) de alguns milésimos de segundo de arco. Isso seria o equivalente a conseguir enxergar uma moeda a uma distância de mais de mil quilômetros! E se pensarmos que as estrelas estão mais longe que 4,5 anos-luz, o problema só aumenta.

Técnicas astrométricas desenvolvidas nos últimos anos, como as que equipam o telescópio espacial *Gaia*, da Agência Espacial Europeia (ESA), são capazes de medir esses minúsculos movimentos oscilatórios das estrelas mais próximas, ajudando a dizer se elas estão acompanhadas de planetas. O *Gaia* tem resolução de cerca de 20 milionésimos de segundo de arco, cerca de 100 vezes melhor que o necessário para detectar a movimentação do Sol, permitindo verificar centenas ou milhares de estrelas com possíveis exoplanetas.

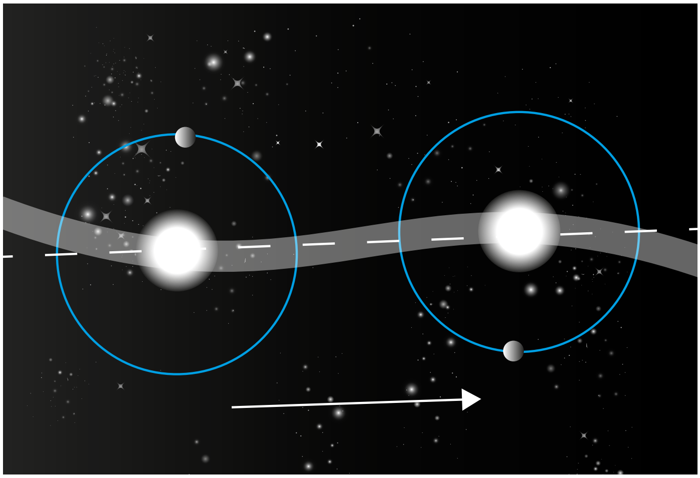


Figura 13.3. Detecção de exoplanetas pelo movimento próprio da estrela devido ao movimento e à gravidade do planeta. Fonte: IAG

Microlentes

A técnica de microlente gravitacional permite a detecção de pequenos exoplanetas a grandes distâncias, tipicamente até cerca de 20 mil anos-luz, ou seja, metade do tamanho de nossa galáxia, enquanto a maioria das outras técnicas, como velocidade radial, trânsitos ou astrometria, é mais sensível nas vizinhanças solares, a algumas dezenas ou centenas de anos-luz.

No evento de microlente, é necessário que duas estrelas estejam alinhadas com a Terra, de maneira que o campo gravitacional da estrela intermediária atue causando uma deformação no espaço-tempo, que é explicada completamente pela teoria da Relatividade Geral (Figura 13.4). Essa deformação faz os raios de luz da primeira estrela (fonte) se curvarem, criando um efeito de lente convergente para o observador na Terra, ou seja, criando uma "lupa gravitacional" que amplia e estende a imagem da estrela ao fundo. Em geral, o evento de microlente gera uma imagem em forma de anel, conhecida como "anel de Einstein". Se o alinhamento é perfeito e a geometria dos objetos também, o anel é perfeitamente circular. Qualquer desvio dessa perfeição gera "defeitos" no anel, que podem ser usados para estudar os detalhes do sistema,

como o tamanho da estrela fonte, ou a presença de planetas na estrela intermediária.

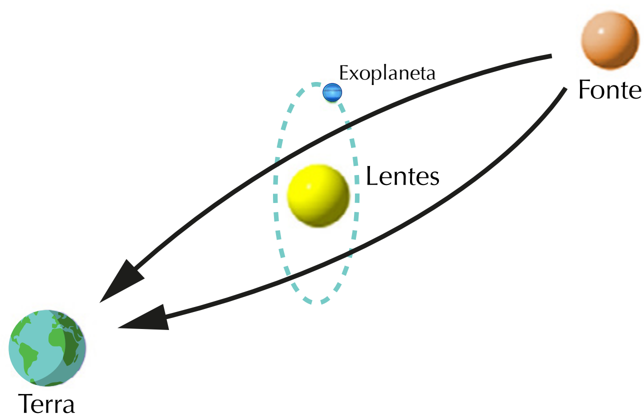


Figura 13.4. Detecção de exoplanetas durante o evento relativístico de microlente gravitacional. Fonte: IAG

O fenômeno de magnificação durante o evento de microlente pode ser tão intenso que a chance de observar um planeta do tamanho de Júpiter, por exemplo, chega a quase 100%, mesmo usando um telescópio pequeno e em ambiente urbano, com poluição luminosa. O problema do evento de microlente é que acontece de maneira aleatória, imprevisível e, na maioria das vezes, apenas uma vez para cada estrela, já que depende de um alinhamento adequado que tem uma probabilidade muito baixa de acontecer. Por isso, muitas das buscas por exoplanetas usando essa técnica se concentram em regiões do céu densamente povoadas por estrelas, como regiões centrais da galáxia, onde a chance do alinhamento fortuito acontecer aumenta. Dessa maneira, essa técnica pode ser usada como "aviso" da existência de planetas em torno de determinada estrela, mas as detecções devem ser confirmadas posteriormente por outras técnicas reprodutíveis, como velocidade radial ou trânsitos.

Detecção direta

Apesar de muitos acharem que os cientistas estão observando diretamente e tirando imagens de outros planetas, essa é a técnica ainda menos usada e mais difícil para detectar exoplanetas. São poucos os casos em que ela foi bem-sucedida e, mesmo assim, foi usada após os planetas terem sido descobertos pelas técnicas descritas anteriormente.

Além dos planetas serem pequenos comparados às estrelas que orbitam, sua luminosidade é muito inferior, pois é causada pela reflexão da luz estelar. Na região do visível, onde a maioria das observações é feita, essa diferença é de cerca de 1 para 1 bilhão, ou seja, a estrela basicamente ofusca a luz do planeta.

No infravermelho o problema é um pouco menor, sendo o ofuscamento de cerca de 1 para 1 milhão, e é nessa faixa espectral que a maioria das observações diretas é feita (Figura 13.5). Mesmo assim, é necessário abafar a luz da estrela de alguma maneira, o que pode ser feito de maneira física, com uma máscara que cobre a estrela (chamada coronógrafo estelar) ou combinando a luz captada por dois ou mais telescópios diferentes, por cancelamento interferométrico.

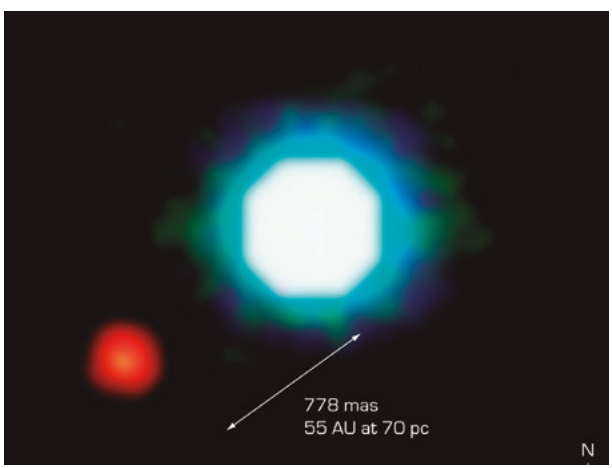


Figura 13.5. Exoplaneta 2M1207b, o primeiro observado diretamente por imageamento no infravermelho em 2004, no telescópio VLT – ESO / Chile, em 2004. Fonte: European Southern Observatory (ESO)

Alguns planetas e sistemas múltiplos puderam ser observados dessa maneira, mas ainda estamos apenas no início do desenvolvimento da técnica, que depende de telescópios mais potentes, especialmente operando no infravermelho. A próxima geração de telescópios gigantes já em construção, como o Thirty Meter Telescope – TMT no Havaí, e o Extremely Large Telescope (ELT) do Observatório Europeu Austral (ESO) no Chile, com espelhos primários de cerca de 30 e 40 m de diâmetro, respectivamente, irão propiciar uma sensibilidade muito maior que os atuais telescópios, de espelhos de 8 a 11 m, sendo inaugurados por volta de 2020. Vale lembrar que o Brasil participa do consórcio do ESO, sendo, portanto, um dos futuros usuários do ELT.

No espaço, teremos o James Webb Space Telescope, que deve substituir o *Hubble* em 2018, também otimizado para o infravermelho, com um espelho de 6,5 m (comparados aos 2,4 m do *Hubble*). O futuro guarda projetos ainda mais ambiciosos, com telescópios terrestres chegando na casa dos 100 m de diâmetro e redes de telescópios espaciais ligados por interferometria, que serão não apenas capazes de captar imagens de planetas do tamanho da Terra, mas também poderão coletar dados dos espectros das atmosferas desses mundos, o que será a chave para entendermos a química de suas atmosferas e, possivelmente, detectar a presença de vida. Essa tecnologia para o estudo espectroscópico de exoatmosferas já começa a dar seus primeiros resultados, com a detecção de moléculas simples (H_2O, CO_2 etc.) em exoplanetas gigantes gasosos, mas no futuro será possível fazer o mesmo com planetas rochosos, mais prováveis de abrigar vida.

Segundo passo: caracterização e detecção de atividade biológica

A distância do planeta em relação a sua estrela hospedeira é fundamental para decidir se um planeta pode ou não ser habitável. Se o planeta estiver muito distante, irá receber pouca radiação, tornando-se gelado. Se estiver muito próximo da estrela, pode ser muito quente e sujeito a atividades estelares intensas e deletérias,

como os eventos de explosões estelares. Entre esses limites está o que chamamos de Zona Habitável (ZH), definida com base na vida conforme a conhecemos, ou seja, na vida que necessita de água líquida disponível. Dessa maneira, a zona habitável é determinada ao calcularmos os limites máximo e mínimo do raio orbital para que o planeta tenha a temperatura correta que permita a presença de água líquida em sua superfície.

Essa definição é bastante simplista, pois sabemos que se o planeta possuir uma atmosfera densa, pode ter temperaturas mais altas do que o esperado, por efeito estufa, ou ainda, se estiver longe do Sol, mas sujeito a forças gravitacionais intensas, como é o caso das luas Europa (de Júpiter) e Encélado (de Saturno), pode sofrer um aquecimento interno pelas forças de maré gravitacionais, que deformam o planeta ou Lua, e manter oceanos de água líquida. Apesar dessas outras possibilidades, a ZH ainda é uma forma de delimitar nossas buscas de vida aos planetas mais promissores encontrados, uma vez que o número desses corpos celestes só tende a aumentar com o tempo, e será muito difícil fazer um estudo aprofundado de todos eles.

Outro importante parâmetro para caracterizar planetas semelhantes à Terra é a densidade. A densidade terrestre é de 5,5 g/cm^3 e a de Vênus é 5,2 g/cm^3. Em geral, planetas com densidade alta, semelhantes à da Terra e Vênus, são rochosos e, por isso, potencialmente habitáveis (novamente, para a vida conforme a conhecemos). Para comparação, a densidade do gigante gasoso Netuno é de 1,6 g/cm^3. Com as técnicas que descrevemos é possível determinar a massa e o raio do planeta (portanto, a densidade), além de algumas características da atmosfera superior. Isso não é suficiente, no entanto, para determinar se o planeta é rochoso ou gasoso, pois uma atmosfera estendida pode bloquear parte da luz estelar e aumentar artificialmente o raio do planeta, e o estudo espectroscópico se torna fundamental.

Com métodos espectroscópicos, medindo a absorção da luz da estrela pela atmosfera do planeta, em seus diferentes comprimentos de onda, é possível dizer qual a sua composição química.

Isso acontece porque diferentes moléculas, como oxigênio, ozônio, água, nitrogênio, dióxido de carbono, entre outras, absorvem a luz de maneira distinta, produzindo características únicas no espectro de absorção dessas atmosferas, que podem ser usadas como assinaturas químicas.

Se formos capazes de detectar esses gases em outros planetas, usando o que sabemos sobre a vida da Terra, e pudermos identificar quais deles são exclusivamente produzidos por atividade biológica, então poderemos usar essas observações para dizer, com certo grau de certeza, que pode haver vida naquele planeta.

A Terra, por exemplo, possui características espectrais muito fortes de moléculas como O_2, O_3, CH_4 e N_2O. Outros dois gases importantes para o desenvolvimento da vida são vapor de água e CO_2, que funcionam como gases estufa. Vários desses gases são produzidos por processos biológicos, como o O_2, que advém da fotossíntese: antes do estabelecimento desse processo biológico, a atmosfera da Terra era basicamente anóxica. Essas moléculas, portanto, podem ser chamadas de bioassinaturas para o caso da Terra e sua presença na atmosfera é dinâmica, variando com o tempo – oxigênio e ozônio se tornaram abundantes após cerca de 2 bilhões de anos da formação da Terra, afetando de maneira drástica o espectro; quando a Terra tinha cerca de 2,7 bilhões de anos, plantas cobriram a superfície, gerando o chamado "limite do vermelho", pela forte absorção da clorofila nessa parte do espectro. Na Figura 13.6, mostramos o espectro simulado da Terra em diferentes épocas geológicas e podemos esperar variedades desse tipo para futuras observações de exoplanetas.

É importante notar que mesmo que detectemos essas possíveis bioassinaturas, elas, por si só, não são necessariamente indicativas de atividade biológica, pois podem decorrer de processos abióticos (sem a participação de organismos vivos), como eventos vulcânicos, tectônicos, geológicos etc. Dessa maneira, não se pode dizer de maneira absoluta que a detecção de uma determinada molécula na atmosfera de um planeta seja um indicativo óbvio de vida extraterrestre.

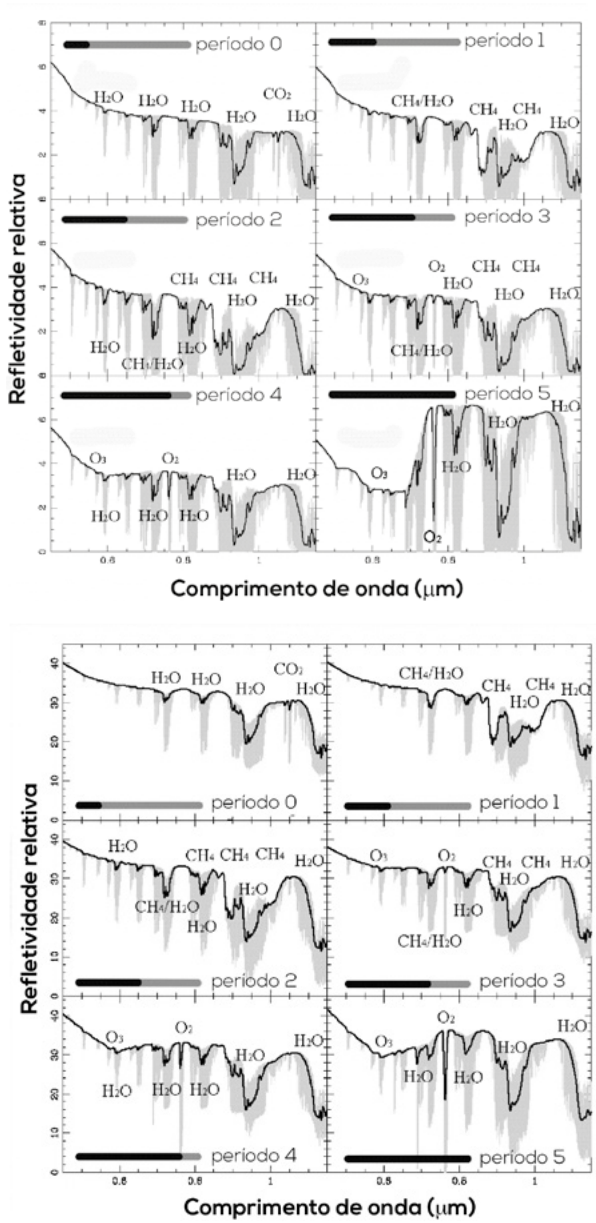


Figura 13.6. Espectros simulados em computador para a Terra, em diferentes idades, mostrando que o espectro da luz refletida por um planeta varia com o tempo, refletindo a evolução biológica e geológica. Fonte: Adaptado de Kaltenegger, Traub e Jucks (2007)

Em 2009, essa controvérsia ocorreu para Marte, com uma detecção de produção de metano (um gás produzido principalmente por organismos vivos, no caso terrestre), em seu verão equatorial. Uma das possibilidades levantadas é que, com o aumento da temperatura de sua superfície nessa estação do ano (podendo chegar próximo aos 20 ºC), o gelo no subsolo poderia descongelar, aumentando a atividade de hipotéticos micro-organismos metanogênicos, que liberariam esse gás na atmosfera. No entanto, rapidamente hipóteses abióticas alternativas, principalmente por reações da água com alguns minerais, no processo chamado "serpentinização", foram mostradas como mais prováveis para explicar o metano.

O que aprendemos é que temos de ser muito cuidadosos em ligar detecções de moléculas com a atividade de vida, por mais óbvio que ela nos possa parecer, pois as condições de outros planetas podem ser muito diferentes das existentes na Terra.

Dessa maneira, apesar de os métodos espectroscópicos serem a maneira mais provável (e talvez a única) de encontrarmos vida em exoplanetas, a interpretação desses dados deve ser muito cuidadosa, exigindo que conheçamos muito mais sobre como a química atmosférica pode ser alterada por diferentes processos planetários, como sua interação com processos geológicos, vulcânicos, tectônicos, fotoquímicos, hidrológicos e, eventualmente, biológicos.

Avanços nesse tipo de estudo, impulsionados pelo trabalho multi e interdisciplinar da astrobiologia em nosso próprio planeta, podem trazer benefícios para o conhecimento do intrincado sistema planetário existente na Terra – praticamente todos os eventos, todas as reações químicas, dependem dos diferentes componentes de nosso planeta, de maneira integrada e dinâmica, incluindo a própria atividade humana e suas consequências, como o aquecimento global e as alterações químicas atmosféricas (como a destruição da camada de ozônio).

Referência

KALTENEGGER, L.; TRAUB, W. A.; JUCKS, K. W. Spectral evolution of an Earth-like planet. *The Astrophysical Journal*, 658, p. 598-616, 2007.

O SETI E O TAMANHO DO PALHEIRO...

Otimismo e pessimismo na busca de nosso alter ego extraterrestre

Capítulo 14

Jorge A. Quillfeldt

Dedico ao amigo Eduardo D. Barcelos –
a vida se esvai, as ideias revivem sem parar

A questão da existência ou não da vida extraterrestre tomou novo fôlego nas duas últimas décadas. A própria Nasa reformulou seu programa geral de metas científicas, estruturando-o em três eixos astrobiológicos – o chamado Nasa Astrobiology Roadmap. São três perguntas básicas: Como a vida surgiu e evoluiu? Existe vida em outra parte do Universo? Qual o futuro da vida na Terra e além? A astrobiologia, que também atende pelos nomes de Exobiologia, Xenobiologia, Cosmobiologia ou Bioastronomia, é um campo multidisciplinar com diferentes áreas de investigação que visam comprovar aquilo que chamamos de hipótese exobiológica (ou astrobiológica) – a hipótese de que existiria vida extraterrestre e/ou de origem independente daquela que conhecemos.

A segunda parte da definição é menos conhecida, mas não menos importante. A rigor, a vida pode ter surgido mais de uma vez em nosso planeta e, se existissem remanescentes dessa *outra linhagem*, isso já responderia a pergunta sobre se há outras formas de vida no Universo. Toda a vida terrestre conhecida, quando estudada em nível molecular, caracteriza-se por uma notável unidade e homogeneidade estrutural somente explicável pelo fato de todos descendermos de ancestrais comuns no passado remoto. Essa hipotética linhagem independente coexistiria mesclada com nossa biota "padrão", talvez até mesmo compartilhando os mesmos nichos ecológicos, apenas não tendo sido ainda detectada. Apesar de já conhecermos e termos identificado quase duas milhões de espécies vivas na Terra (todas com seu nome científico), apenas algumas dezenas são conhecidas em nível celular e molecular, os chamados *organismos-modelo*: hipoteticamente, alguns dos demais organismos conhecidos poderiam ter, de fato, origem distinta, constituindo o que se convencionou chamar de *Biosfera Sombra*. A relevância científica de um achado desses não seria menor, apesar de seu caráter evidentemente menos glamouroso.

A astrobiologia vive momentos gloriosos hoje em dia, não só com o avanço da biologia de micro-organismos – no qual o estudo de extremófilos desponta como o campo mais promissor, pois é o tipo de vida que mais se espera encontrar alhures – mas também com o explosivo aumento do número de exoplanetas com dimensões e características similares às terrestres, detectados através de telescópios espaciais. As expectativas se ampliaram com as duas missões mais recentes ao planeta vermelho, uma norte-americana – o laboratório móvel *Curiosity* (Mars Science Lab), o maior e mais completo laboratório científico já levado para fora da Terra, que pousou em 2012 – e uma indiana – o módulo orbital *Mangalyaan*, que chegou em 2014 para monitorar a superfície e estudar a atmosfera. Em setembro de 2015, a Nasa anunciou a comprovação, pela sonda orbital *MRO*, de água líquida corrente (salgada) na superfície do planeta, mais uma notícia alvissareira na busca de vida atual ou pregressa em Marte. Parece inacreditável, mas

temos, neste momento, nada menos que *sete sondas operando em Marte simultaneamente* – cinco em órbita e duas na superfície (a sonda *Opportunity* de 2004 ainda está operacional) – e espera-se muitos achados importantes, especialmente sobre a habitabilidade de nosso planeta-irmão. Marte é, sem dúvida, o maior laboratório exobiológico de que dispomos no Sistema Solar.

Tantas novidades pululando tendem a ofuscar o fato de que essa área da ciência iniciou sua jornada científica há mais de cinquenta anos, em uma época em que tanto a biologia (DNA) quanto a astronáutica (*Sputnik*) ainda engatinhavam. A suposição de que poderia haver vida extraterrestre já tinha uma longa história, mas se resumia a uma coleção de palpites bastante pobres do ponto de vista científico. Faltava uma formulação que fosse testável experimentalmente e, portanto, refutável, como qualquer boa hipótese científica.

Foi apenas em setembro de 1959 que apareceu a primeira formulação realmente "científica" da hipótese exobiológica, em um artigo publicado por Cocconi e Morrison na prestigiosa revista *Nature*. O argumento concatenava algumas suposições preliminares: Se a vida é possível e surgiu em outros planetas, por que não haveria também vida inteligente? E, se há vida inteligente, por que não poderia ter se desenvolvido até o nível de civilização tecnológica, possuindo conhecimentos similares aos que nós já tínhamos? Se isso for verdade, poderíamos contatá-la imediatamente empregando sinais de rádio, uma vez que a *radioastronomia* já estava bem desenvolvida naquele momento. Como nenhum achado acidental tinha surgido até então, o radiotelescópio despontava como a melhor ferramenta para se testar a hipótese exobiológica. Surgia, assim, o SETI (Search for Extraterrestrial Intelligence), sigla em inglês para Busca por Inteligências Extraterrestres (BIET).

O SETI é um ramo da astrobiologia dedicado à busca de mundos habitados mediante a detecção de *ações tecnológicas deliberadamente executadas por organismos extraterrestres que supostamente lá habitem*. Essa definição, elaborada por Jill Tarter, diretora do Center for SETI Research e pioneira na área, amplifica e esclarece o enunciado tradicional, mais obscuro, que fala apenas em "detectar

inteligências extraterrestres". Como área de investigação, emergiu sobretudo entre astrônomos e físicos, cativando pouquíssimos pesquisadores da área biológica, até porque o conhecimento da época era limitado e predominava a ideia de que a vida era de natureza muito frágil e fruto de uma sucessão pouco provável de acidentes: com a descoberta dos micro-organismos extremófilos nos anos 1970, o cenário mudou – a vida não era algo assim tão delicado e raro, pelo menos no nível unicelular. A astrobiologia tomou novo fôlego, e o rumo que hoje a caracteriza, talvez por agora dispor de objeto de estudo mais palpável e menos especulativo, afastou-se do "enfoque SETI" da hipótese exobiológica, inclusive rejeitando-o com certa veemência.

O programa do SETI consistia, portanto, em procurar evidências de "domínio de determinadas tecnologias" empregadas "intencionalmente", cuja expressão (sinais, artefatos etc.) fosse claramente distinguível de eventos naturais conhecidos. A rigor, tais evidências poderiam assumir três formas: visita direta; descoberta de artefato tecnológico presente em algum lugar no Sistema Solar ou; recepção de sinais de rádio contendo mensagens codificadas. As duas primeiras alternativas implicam emprego de viagens interestelares, o que, de acordo com o conhecimento científico atual, não parece valer muito a pena, especialmente no caso de voos tripulados – seriam viagens longas demais para serem justificadas à sociedade que as promovesse, mas talvez fossem plausíveis com o emprego, por exemplo, de *sondas automáticas*, especialmente as do tipo *autorreplicante*. São possibilidades fascinantes que, entretanto, flertam com a ficção científica ou se confundem com engodos pseudocientíficos como a *ufologia*. A realidade, porém, é que, até o momento, *não surgiu nenhuma comprovação material* de qualquer uma dessas três possibilidades. Mesmo a radioescuta sistemática – definitivamente a menos "sensacional" das três alternativas – não nos trouxe qualquer prova em mais de cinquenta e cinco anos de esforço.

Qual a razão desse fracasso? Para entendermos isso – e saber se se trata realmente de um "fracasso" – é necessário termos uma boa noção das reais dificuldades envolvidas na empreitada.

"Combinando" o jogo com os extraterrestres...

O artigo pioneiro da *Nature* (Cocconi; Morrison, 1959) propunha introduzir uma radioescuta com os radiotelescópios já disponíveis – como os mostrados na Figura 14.1 – para a detecção de possíveis emissões "artificiais", talvez informativas, oriundas de hipotéticas civilizações extraterrestres, e dedicou-se principalmente a discutir a primeira grande dificuldade técnica: em que frequência devemos escutar?



Figura 14.1. Radiotelescópios usados para detectar emissões de hipotéticas civilizações extraterrestres. Fonte: Graeme L. White & Glen Cozens (James Cook University)

O espectro do rádio/micro-ondas consiste das mesmas ondas eletromagnéticas que constituem a luz visível, o ultravioleta, o infravermelho e os raios X, diferindo apenas na janela de frequências/comprimentos de onda, que, no caso, situa-se entre os 3 kHz e os 300 GHz (correspondentes a comprimentos de onda que vão desde o milímetro até o quilômetro). Afora o problema do quanto passa ou não através da atmosfera (Figura 14.2), a captação das ondas de rádio tem outra limitação técnica fundamental: a tecnologia que dispomos

permite captação de sinais de rádio apenas em frequências específicas, uma de cada vez, portanto a escolha prévia da “frequência certa” é algo decisivo. O desenvolvimento do receptor multicanal, que detecta simultaneamente muitas diferentes frequências, minimizou essa dificuldade, mas, mesmo assim, o espectro do rádio é extraordinariamente amplo, sendo difícil cobrir tantas frequências. O SETI, em mais de 100 projetos de escuta durante décadas, nunca conseguiu cobrir todo o espectro das ondas de rádio. A dificuldade é análoga à de se adivinhar o número do celular de alguém ao acaso em uma cidade como São Paulo: a única forma de acertar em situações como essa seria “combinar previamente” com os adversários, parodiando a genial tirada de Garrincha na Copa de 1958. Como isso não pode ser feito, a alternativa adotada foi a de escolher frequências iguais às de certas emissões naturais onipresentes e torcer para que os ETs tenham a mesma ideia.

E foi exatamente isso que sugeriram Cocconi e Morrison naquele trabalho: a frequência mais lógica para essa prospecção seria ao redor dos 1420 MHz, que corresponde à linha de emissão de 21 cm do hidrogênio neutro, a emissão de rádio mais comum no Universo, já que é o átomo mais abundante que existe. A suposição (ou esperança) é que tal fato científico seria do conhecimento de qualquer civilização tecnológica que estivesse dando seus primeiros passos na radioastronomia. Ainda seria um “chute”, claro, mas pelo menos seria um “chute informado”, e já seria um começo. É, de fato, a opção mais explorada até hoje nos diversos projetos do SETI já realizados, inclusive o extenso SETI@home (ver mais adiante).

Outra opção muito explorada é a frequência apelidada de “buraco d’água” (Figura 14.2) – a janela entre a emissão do hidrogênio (H) e a da hidroxila (OH), centrada nos 1.720 MHz: essa metáfora alude aos escassos bebedouros que existem na savana africana, na qual diferentes espécies, até mesmo predador e presa, se encontram para beber em regime de trégua. Sinais nesta janela sugeririam que compartilhamos certos conhecimentos fundamentais, como a noção de que a água é uma molécula-chave para a vida.

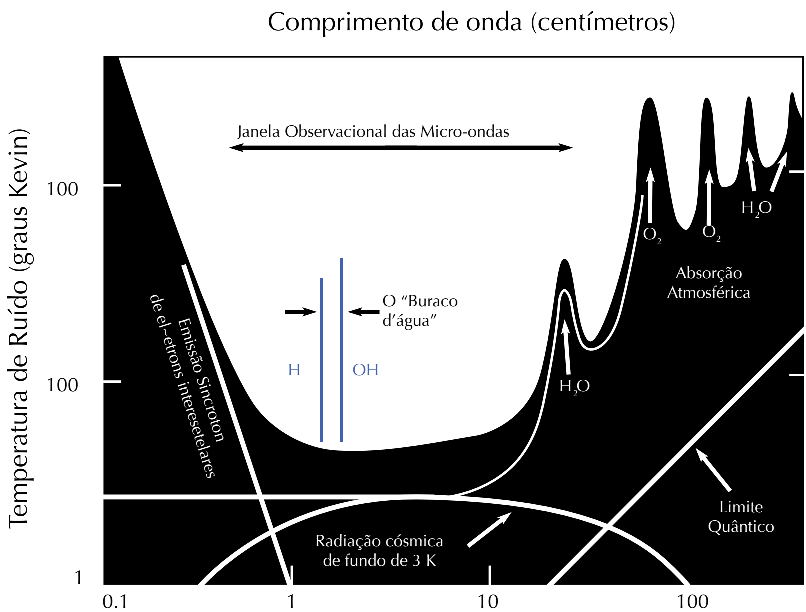


Figura 14.2. A frequência "buraco d'água". Fonte: Adaptado de Sky & Telescope. Usado com permissão.

O referido artigo encerrava com um comentário realista, mas bastante provocador: "a probabilidade de sucesso é difícil de ser estimada: mas se nunca buscarmos, as chances de sucesso serão nulas". Em abril de 1960, Frank Drake iniciava (independentemente) o Projeto Ozma, o primeiro teste de radioescuta de duas estrelas então tidas como promissoras – Epsilon Eridani e Tau Ceti – no Observatório Nacional de Radioastronomia em Green Bank, Virgínia (EUA).

Escolhendo o "mensageiro"

Alguns podem se perguntar, e com razão, por que "escutar" em frequências do rádio já que existem tantos tipos de ondas eletromagnéticas? As razões por trás dessa opção são essencialmente de natureza prática. Emissões intencionais de sinais, para serem úteis, precisam ter certas características básicas: devem ser fáceis e baratas de produzir (exigir pouca energia); ter a maior velocidade possível; não ser muito absorvidas no caminho e poder dirigir-se

diretamente para onde foram apontadas. Os dois fenômenos físicos capazes de portar informações nessas condições seriam ondas eletromagnéticas e feixes de partículas subatômicas, mas essa última opção é inadequada, pois partículas têm massa, e o custo energético de acelerá-las seria imenso, além de serem facilmente absorvíveis no caminho (ou defletidas por campos magnéticos estelares, no caso de partículas carregadas). Já fótons, que são *quanta* de radiação eletromagnética, são ideais por não possuírem massa, por se propagarem à velocidade da luz – a máxima velocidade no Universo conhecido – e serem produzidas com baixo custo energético: todas as vantagens acima reunidas!

O próximo passo a se levar em conta seria a *atmosfera*, principal obstáculo interposto entre a fonte e nós: nossa capa gasosa é transparente apenas para a luz visível e boa parte das micro-ondas/rádio e radar, absorvendo quase todo o resto e deixando passar apenas uma pequena fração dos comprimentos de infravermelho e ultravioleta (raios X e gama são inteiramente retidos na alta atmosfera, para nossa sorte!). Mais uma vez desponta o rádio como janela de frequências de "livre" trânsito, entre os diferentes comprimentos de onda possíveis do espectro eletromagnético.

Emissores de ondas eletromagnéticas podem ser de dois tipos – omnidirecionais ou dirigidos. Os primeiros propagam-se em todas as direções produzindo uma esfera que se expande, mas, por causa disso, a potência do sinal chega cada vez menor aos alvos, conforme a distância percorrida – P cai com o inverso do quadrado da distância. Emissores dirigidos, por outro lado, conseguem apontar um feixe relativamente colimado em uma direção específica – por exemplo, às vizinhanças de uma estrela que tenha planetas potencialmente habitados, concentrando toda energia apenas naquela seção angular do céu.

Uma forma melhor ainda de garantir a direcionalidade do sinal e, ao mesmo tempo, evitar grandes perdas por absorção pela matéria interestelar seria empregar feixes colimados de *luz coerente*, escolhendo radiação eletromagnética com comprimentos de onda dentro da janela para a qual nossa atmosfera é transparente. Ou

seja, empregar sinais codificados de laser seria algo próximo do ideal. Essa sugestão, aliás, foi feita em 1961 por um dos inventores da tecnologia, Charles Townes. O uso do laser traz mais uma vantagem para determinar a origem do sinal: podemos produzir e detectar pulsos muito rápidos, da ordem de nanossegundos, e como não se conhece nenhum processo natural capaz de produzi-los, saberemos que seriam artificiais. Por essa razão, a Oseti (Optical SETI) é uma das vertentes atualmente mais desenvolvidas do SETI, e explora ainda outra vantagem técnica do laser luminoso, que é o fato de detectores nessa faixa do espectro capturarem e analisarem *simultaneamente* muitos comprimentos de onda diferentes. Na recepção de rádio, como vimos, temos a limitação de sintonizar uma frequência/comprimento de onda – o “canal” ou “estação” de rádio – por vez, o que torna o processo mais caro, complexo e demorado, se o que queremos é varrer um espectro que, como se não bastasse, é muito mais amplo que o da luz visível.

Com tantas dificuldades, sobrevém um certo pessimismo, e é natural que nos perguntemos de onde os primeiros promotores do SETI tiravam tanta motivação?

Fermi, Drake e Brin: quão otimistas podemos ser?

Mesmo antes do SETI ter surgido como ciência, já havia críticas ao suposto exagero de se *supor* a existência de civilizações tecnológicas extraterrestres. Em 1950, o notável físico Enrico Fermi, em um almoço com colegas em Los Alamos, discutia um cartum publicado na *New Yorker* que brincava com a possibilidade de ETs serem os responsáveis pelo recente sumiço de latas de lixo na cidade. A conversa girava em torno de extraterrestres e da possibilidade de naves viajando mais rápido que a luz, quando Fermi, do nada, explodiu com uma pergunta: Se o Universo está fervilhando de alienígenas, “então onde está todo mundo?” A consternação foi geral e, de certo modo, a pergunta repercute até hoje. De fato, se existisse vida inteligente e tecnológica em outros planetas, e se fosse mais antiga que nós, não existiriam sinais *muito* evidentes de sua existência? Sejam eles sinais de rádio, visitas de artefatos

automáticos ou tripulados, ou mesmo evidências astronômicas de astroengenharia em escalas inconcebíveis para nós: apontaríamos o telescópio para uma determinada região e avistaríamos o equivalente cósmico de letreiros luminosos ou construções gigantescas? Nada disso foi visto até hoje, não custa lembrar. A pergunta era pertinente, e caia como um balde de água fria nos mais "otimistas", e ficou conhecida como o célebre Paradoxo de Fermi.

Mas os "otimistas" nunca se deram por derrotados e tentaram, mesmo sem provas, estimar o número possível de civilizações existentes *neste momento*... Porém, diante das vertiginosas distâncias que separam as estrelas e o limite físico representado pela velocidade da luz, a expressão "neste momento" não significa muita coisa, pois, uma vez que não podemos nos comunicar instantaneamente, qualquer sinal que recebermos será necessariamente oriundo do passado e pode inclusive ser bastante remoto. Voltaremos a esse ponto na próxima seção, mas antes examinemos a Equação de Drake (ou Equação de Green Bank), conhecido paradigma do SETI que pretende estimar o número de civilizações presentes em um dado "momento" na galáxia e que seriam, de algum modo, detectáveis. Essa equação *estima* a probabilidade de vida inteligente civilizada/tecnológica partindo do número de estrelas com planetas em que a vida teria surgido e fracionando-o sucessivamente, segundo "chutes" inteligentes para cada fator considerado, até chegar a um determinado valor. A expressão tem o seguinte aspecto:

$$N = R^* . f_p . n_e . f_l . f_i . f_c . L$$

Cujas variáveis são:

N = número de civilizações em nossa galáxia com a qual a comunicação seria possível hoje;

R^* = taxa média de formação de estrelas por ano em nossa galáxia;

f_p = fração dessas estrelas que possuem planetas;

n_e = número médio desses planetas que são do tipo terrestre e se localizam na zona de habitabilidade (com temperaturas que permitem água no estado líquido);

f_l = fração do número acima na qual efetivamente surgiu vida em algum momento;

f_i = fração do número acima na qual efetivamente emergiu vida inteligente;

f_c = fração do número acima na qual efetivamente se desenvolveu tecnologia capaz de emitir sinais detectáveis do espaço;

L = período durante o qual essa civilização permanece emitindo sinais detectáveis no espaço, não importando a causa.

É importante dizer que, apesar de seu aspecto imponente, essa expressão matemática não é uma "equação" matemática propriamente dita, nem tem o poder preditivo de um verdadeiro modelo teórico. Frank Drake a criou apenas como um tipo elegante de "agenda" para as discussões que ocorreriam no primeiro encontro do SETI realizado em 1961, em Green Bank, reunindo um pequeno, porém seleto grupo de colegas que se autointitulava "A ordem do golfinho". Não tinha a pretensão que seus críticos (e alguns divulgadores menos informados) pretenderam conferir-lhe.

Na época, apenas um dos fatores da "Equação" de Drake podia ser empiricamente estimado, R*. Hoje sabemos alguma coisa sobre exoplanetas e podemos fazer estimativas de f_p e n_e, mas os quatro últimos fatores da equação continuam sendo um completo mistério, com exceção talvez do L (veja próxima seção). Como calcular f_l quando conhecemos apenas *um* planeta com vida, o nosso? Daí ao surgimento de inteligência e disso à emergência de civilizações tecnológicas vão outros saltos enormes. Desse modo, as lacunas conceituais acabam preenchidas por meras conjeturas individuais, subjetivas, que dizem mais sobre nossas motivações

pessoais – otimistas ou pessimistas – do que da realidade. Por isso o "resultado do cálculo" varia de zero (ou menos) até 6 ordens de grandeza! "Otimistas", como Carl Sagan, chegaram a calcular em 1 milhão o número de civilizações na galáxia (número que depois ele reduziu), enquanto "pessimistas", como von Hoerner e Frank Tipler, obtiveram números bem menores, inclusive negativos (que apontavam a raridade de nossa condição).

Claro que, quanto maior esse número, menor a distância média entre as estrelas envolvidas, e, assim, mais provável o contato. Era esta a função desse dispositivo formal: ser uma estratégia de persuasão para a época – o que permitiu justificar publicamente os (poucos) investimentos angariados nas primeiras décadas do SETI até sua interrupção, com os cortes de verbas do governo estadunidense no começo dos anos 1990. O próprio Frank Drake explicava que a equação não resolvia o Paradoxo de Fermi, mas ao menos servia para "organizar nossa ignorância".

Mas, se a Equação de Drake elenca os fatores tidos como essenciais em 1961, ela está longe de listar todos. Para entender as dificuldades do SETI é preciso mencionar a existência de uma segunda equação, complementar à de Drake, proposta por David Brin em 1982. Brin incorpora dois fatores originalmente ignoradoss: migração (ou colonização) interestelar e decisão da suposta civilização de se expor ou não a um contato. A formulação original de Drake supunha que cada civilização técnica estaria confinada ao seu planeta original e, sem exceções, aberta para contato, duas simplificações que afetam enormemente os cálculos. Na visão de Brin, mesmo que poucas civilizações tivessem surgido, elas poderiam ter se espalhado pela galáxia, presencialmente ou através de sondas-robô, de modo que o fator colonização aumentaria enormemente a probabilidade de contato. Por outro lado, qualquer civilização poderia decidir não se expor deliberadamente por razões de segurança, de forma que, mesmo podendo enviar sinais, não o faz, diminuindo a probabilidade de contato. Com a formulação de Brin, as estimativas passam a ser mais elaboradas (e o otimismo é realimentado), mas muitas das críticas anteriores persistem.

Um balde de água fria no oceano cósmico?

Nesse emaranhado de dificuldades técnicas e limites físicos não faltam razões para justificar o "insucesso" do SETI nesses anos todos, mas também não nos esqueçamos das possíveis causas "externas" para tal dificuldade, ou seja, não seria tanto uma falha nossa: talvez não tenhamos conseguido captar nenhum sinal inteligente até agora porque não há nenhum para receber, pelo menos não *agora*. Essa possibilidade desalentadora não pode ser descartada. Outro problema, agravado pelas distâncias interestelares, seria que os sinais, mesmo existindo, não são recebidos por causa do "horário" da tentativa de escuta. Isto é, ocorre um "desencontro". Todos conhecem e se comovem com os dramas literários em que os amantes falham em se encontrar como combinado, como no *Romeu e Julieta* de Shakespeare, ou no filme *Tarde demais para esquecer*, clássico de 1957 com Debora Kerr e Cary Grant, circunstância sempre possível.

Aqui cabe mencionar o brilhante livro de Stephen Webb *Where is everybody?*, cujo título completo é, na verdade, *Se o universo está fervilhando de aliens... onde está todo mundo? Cinquenta soluções para o Paradoxo de Fermi e o problema da vida extraterrestre*. Webb divide as "soluções" em três grandes classes: "Eles estão aqui" (descrevendo 8 cenários afins); "Eles existem, mas ainda não nos comunicamos" (com 28 cenários plausíveis); e "Eles não existem". Embora esta última possibilidade sempre exista, as soluções menos fantasiosas remetem sempre aos problemas básicos advindos das grandes distâncias e do tempo necessário para as ondas eletromagnéticas percorrê-las.

De fato, de todos os itens possíveis elencados acima, *dois deveriam ser sempre levados em conta simultaneamente* ao discutirmos as chances de um encontro extraterrestre bem-sucedido: as *distâncias* envolvidas – logo, o tempo necessário para percorrê-las – e o *tempo de duração dessas civilizações*. As distâncias entre as estrelas são estonteantes, obstáculos difíceis de serem ultrapassados, ainda mais levando-se em conta que a velocidade

máxima permitida pela física atual é a velocidade da luz, aproximadamente 300.000 Km/s, que não podemos atingir mediante aceleração mecânica.

As estrelas em nossa galáxia distam entre dezenas e milhares de anos-luz entre si, que é também o tempo, em anos, que sinais eletromagnéticos enviados entre elas precisariam para atingir seus destinos. Mas a outra limitante não é menos importante: se civilizações têm sempre uma duração *L* finita e, sobretudo, relativamente curta, como tem sido muitas vezes o caso na história da humanidade neste sofrido planeta, e estando separadas por distâncias de dimensões no mínimo comparáveis, podemos compreender como é fácil ocorrerem desencontros no vasto cosmo.

A Figura 14.3 ilustra esse conceito de *contactabilidade* (em tempo real), uma vez que observar o céu noturno significa sempre olhar para o passado: podemos até imaginar sermos coetâneos a outros povos igualmente equipados (como são as civilizações B e C em 3A, e as A e C em 3B), mas exatamente por esse motivo, elas nunca conseguirão saber uma da outra: são exemplos de simultaneidade temporal não verificável. A Figura 14.3A mostra a Terra como "ouvinte privilegiada", estando exatamente na janela de recepção de sinais das civilizações B e D, situadas a diferentes distâncias, mas é evidente que seria um privilégio basicamente *unidirecional*: somente nós nos beneficiaríamos desse contato. Por causa das posições temporais *versus* distâncias, B teria mais tempo disponível que D, mas ambas teriam de "apostar" igualmente em nossa (suposta) existência, pois não teriam possibilidade de confirmá-la.

A realização dos contatos representados nessas ilustrações hipotéticas tem pelo menos quatro suposições implícitas: (a) que B e D desejam intencionalmente contatar-nos; (b) que invistam recursos nessa *transmissão* durante todo seu *L* sem saber se existe alguém aqui para receber algo; (c) que nós investimos na *radioescuta* (mesmo com o risco de não haver coisa alguma, ou, se houver, de não podermos *dialogar* com o emissor); e (d) que a

mensagem contenha informação positiva (de acordo com *a* e *b*, essa mensagem poderia ser um mero desabafo, mas nada impede que tenha conteúdo de risco para nós). Resta um último problema: e se todo mundo só está escutando e não transmitindo? Seria o caso de contar com "vazamentos" de transmissões para outro fim. É o nosso caso, pois sobretudo escutamos, e fizemos poucas transmissões (muito curtas, aliás): atualmente se discute inclusive se é *seguro* propagandear nossa existência em um cosmo desconhecido e potencialmente cheio de riscos. Alguns desses pontos são magistralmente ilustrados e discutidos no filme *Contato*, baseado no romance homônimo de Carl Sagan, que infelizmente não viveu para assistir à versão final.

As dificuldades não param por aí: na Figura 14.3B, vemos que uma pequena modificação na distribuição espacial (as posições temporais de A e B são trocadas por A′ e B′) diminui muito mais as chances de contato, enquanto na Figura 14.3C uma pequena defasagem de alguns anos faz que as cinco civilizações quase coetâneas simplesmente fiquem impossibilitadas de entrarem em contato (e de confirmar sua existência através de sinais eletromagnéticos). Nesse cenário, parece razoável supor que civilizações capacitadas *desistam* de enviar (e talvez monitorar) sinais eletromagnéticos, evitando os custos de uma aposta por demais incerta.

Porém, como não temos nenhuma ideia de qual seja o *N*, nem como são os *L*, nem como se distribuem tais hipotéticas almas gêmeas pela galáxia, investir na escuta ainda faz sentido, pois dá vazão ao argumento final de Cocconi e Morrison (1959).

A Figura 14.3D mostra que a melhor forma de aumentar a chance de contato, e mesmo permitir alguma troca de informações, ocorreria se uma das civilizações (B″, no caso) tivesse um *L* muito maior, o que provavelmente resolveria o problema do custo energético ao mesmo tempo que poderia injetar "paciência" maior no processo. Mesmo assim, o diálogo bidirecional seria bastante impraticável, posto que lentíssimo: imaginem um "diálogo" em que séculos separassem as perguntas das respostas... Tais civilizações hipotéticas de

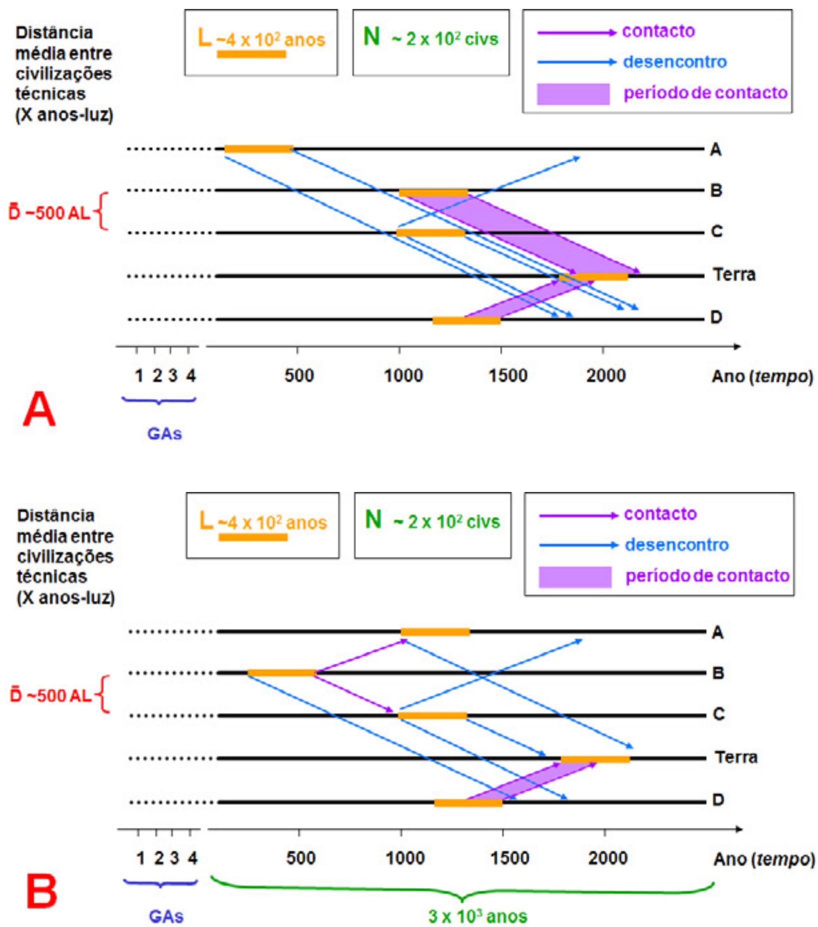
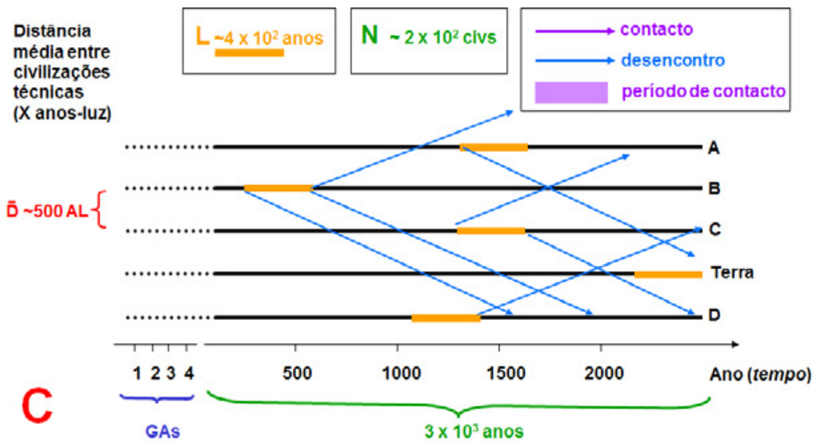
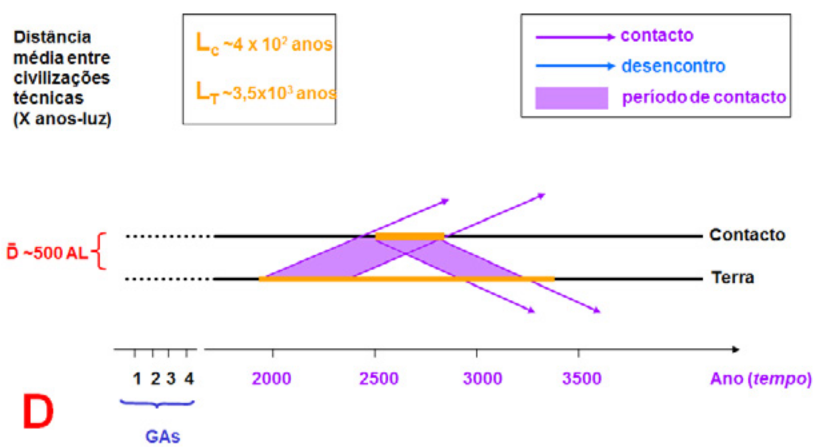


Figura 14.3. As dificuldades na coincidência temporal para garantir o contato por rádio entre otimista de N ~ 200 civilizações tecnológicas distribuídas homogeneamente na galáxia tecnológicas como sendo a média das civilizações terrestres (~400 anos, o fator *L* a civilização receptora, sem possibilidade de diálogo. "Diálogos" seriam lentíssimos e pudesse ocorrer localmente. Quanto menor o *N*, mais improváveis os contatos. Pequenas

Fonte: Elaborado pelo autor





duas ou mais civilizações – também dificilmente coetâneas – considerando-se uma estimativa (distância média D ~500 AL) e mais otimista ainda por supor a duração dessas civilizações da equação de Drake). Os "contatos" geralmente seriam unidirecionais, beneficiando apenas possíveis apenas aumentando-se o *L* ou diminuindo-se o *D* (ao aumentar *N*), embora variações na posição temporal fazem contatos garantidos deixar de ocorrerem.

longo *L*, porém, são ainda mais especulativas que civilizações análogas às terrestres. Nesse caso, o grande *L* da civilização B" permitiria que ela conhecesse todas as civilizações vizinhas próximas e até pudesse "dialogar" um pouco com uma delas.

Em resumo, entre os fatores determinantes da probabilidade de contato ê – chamemos esse fator de "contactabilidade" – a relação entre *L* (em anos) e a distância *D* (em anos-luz) é decisiva. Sendo ê = L/D, o ideal é que ê >>> 1, isto é, quanto maior o *L* e/ou menor o *D*, maior a chance de contato. Tudo isso é consequência direta das distâncias e tempos muito grandes, pois além dos abismos espaciais que nos separam, possíveis civilizações, com suas curtas durações de poucos séculos, podem ocorrer aleatoriamente em qualquer momento ao longo de um vastíssimo período de bilhões de anos, fazendo que as condições para um contato efetivo sejam verdadeiras impossibilidades. Assim, mesmo partindo-se das estimativas mais otimistas obtidas pelas equações de Drake e Brin, e mesmo supondo que sejam muitas as civilizações ativas neste momento, isso pode não ser suficiente para garantir que ocorra um contato. O Universo é um lugar muito grande.

Uma agulha no palheiro de nove dimensões!

Jill Tarter, do importante SETI Institute, instituição que carrega essa bandeira, listou mais de uma centena de projetos de escuta estabelecidos desde 1960, sendo que os principais foram (ou são): Beta (em Harvard, interrompido pela destruição da antena por uma tempestade), Meta II (na Argentina, cobrindo o hemisfério Sul), Phoenix (itinerante, continuação de projeto da Nasa abortado em 1993 por falta de financiamento), Serendip (em Arecibo, Porto Rico, – Figura 14.4 – com a vantagem de registrar continuamente pegando "carona" em equipamentos utilizados para outros experimentos, uma técnica chamada "comensal") e seu projeto associado de análise de dados por

computação distribuída, SETI@home (Figura 14.5), sem falar na importante contribuição amadora (Argus, SETI League etc). Na área da Oseti (Optical SETI, com observação de laser) temos os projetos das Universidades de Harvard e Princeton, além do Serendip. Alguns desses projetos priorizam a área de cobertura do céu, outros, o tempo de observação de candidatos promissores; enfim, as estratégias variam, mas uma coisa é certa: apesar de essas buscas estarem sendo feitas esporadicamente há mais de 50 anos, isso não significa – nem de longe – que conseguimos cobrir todas as possibilidades existentes. Ou seja, ainda não cobrimos nem todos os pontos do céu, nem todas as frequências possíveis, e certamente nada disso foi feito, na prática, por tempo suficiente. Na verdade, seria um milagre achar algo nessa busca que se aproxima da proverbial procura da "agulha no palheiro".

Mas a metáfora do palheiro – uma pilha tridimensional onde o desafio consiste em localizar algo muito pequeno e discreto – não termina aí. Esse palheiro incomum tem as dimensões de nossa galáxia (esqueçam o resto do Universo, por enquanto), e como se não bastasse, há ainda *mais parâmetros* para se considerar: a Figura 14.5 mostra o "espaço de buscas" dos principais projetos SETI até o ano 2000, mostrando três eixos principais, as frequências exploradas, o volume do céu e a sensibilidade do registro. Essas três dimensões são, na verdade, cinco, pois o volume escrutinado se desdobra nas três dimensões espaciais, X, Y e Z.

A Figura 14.5 deixa claro que cobrimos uma fração ínfima de todo esse "volume" possível. E ainda é preciso computar pelo menos outras quatro dimensões para apreciarmos plenamente o tamanho do desafio: o deslocamento de frequência (relacionado ao desvio Doppler-Fizeau resultante do movimento orbital do planeta de origem dos sinais), o ciclo ligado-desligado (qualquer equipamento opera assim, na prática), e os dois sentidos ortogonais de polarização circular da radiação detectada (que dá mais dois eixos que devem ser examinados separadamente para não se perder



Figura 14.4. Radiotelescópio de Arecibo (Porto Rico) – o maior radiotelescópio fixo do mundo – onde foi instalado o programa Serendip, desenvolvido pela Universidade da Califórnia, Berkeley. Fonte: Arecibo Observatory/NSF

nada de relevante). Somando tudo, são nove variáveis/dimensões, o que exigiria um *gráfico eneadimensional* para ser representado matematicamente. Visualmente, seria uma figura tão abstrata, quanto pouco útil, mas daria uma ideia qualitativa da complexidade das dificuldades enfrentadas pelo SETI. Segundo o radioastrônomo argentino Guillermo Lemarchand (2010), se considerarmos todas as buscas já realizadas até hoje, só cobrimos 10^{-14} de tudo que há para se examinar, ou seja, um centésimo trilionésimo de todas as frequências, direções celestes e demais parâmetros desse descomunal palheiro cósmico. Enfim, ainda temos *muito o que fazer*, e estamos realmente longe de quaisquer conclusões, inclusive as negativas.

Mas, afinal, existem as tais civilizações extraterrestres? A resposta mais honesta seria "não sabemos", já que as dificuldades de se achar uma agulha em um palheiro de nove dimensões são, pelo menos, perfeitamente compreensíveis.

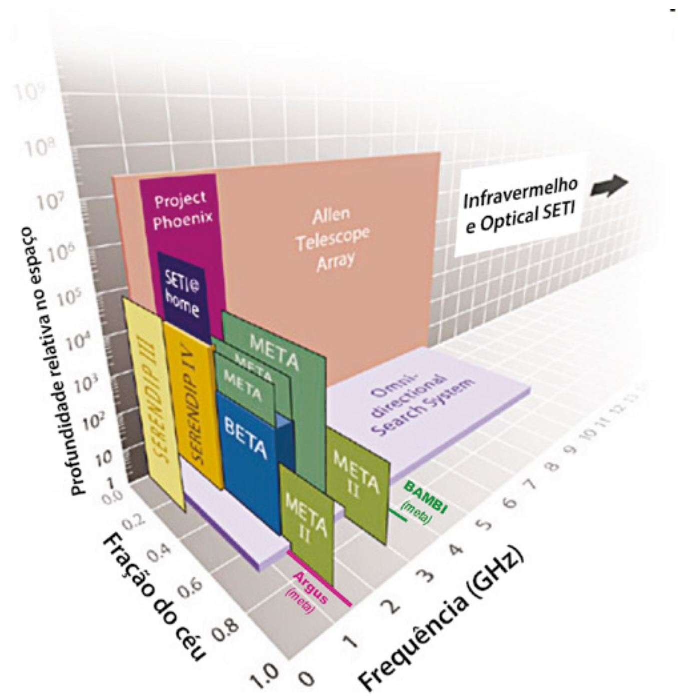


Figura 14.5. Volume coberto até o momento pelos principais projetos SETI de escuta de rádio, mostrando que cada estudo é limitado em ao menos um desses três eixos. O eixo da sensibilidade tem unidades escaladas para o volume relativo de espaço (número de estrelas) examinadas em determinada direção para uma transmissão alienígena de determinada potência. Dois projetos mais recentes, o Telescópio Allen (ainda em desenvolvimento) e o hipotético (e quase ideal) Sistema de Busca Omnidirecional (OSS) – que monitoraria, o tempo todo, cada ponto do céu, em cada canal possível entre os extremos da janela de micro-ondas (de 1 a 11 GHz) – dariam maior cobertura que todos os projetos anteriores, mas apenas em dois desses eixos, sendo que o grosso do "volume" continuaria inexplorado (e isso que acima estão representadas apenas cinco das nove dimensões – a "fração do céu" compacta as três dimensões espaciais). O projeto Argus não deixa de ser um protótipo de um OSS. Fonte: Adaptado de Sky & Telescope ©2005. Usado com permissão.

Referências

Barcelos, E. D. *Telegramas para Marte:* a busca científica de vida e inteligência extraterrestres. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 2001.

Barcelos, E. D.; Quillfeldt, J. A. Onde estão todos os outros? *Scientific American Brasil*, p. 29-35, 2003. Disponível em: http://www2.uol.com.br/sciam/reportagens/onde_estao_todos_os_outros_.html. Acesso em: 30 out. 2015.

Cocconi, G.; Morrison, P. Searching for interstellar communications. *Nature*, v. 184, n. 4690, p. 844-846, 1959.

Harrison, A. A. Fear, pandemonium, equanimity and delight: human responses to extra-terrestrial life. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, v. 369, p. 656-668, 2011.

Lemarchand, G. A. Búsqueda de señales de actividad tecnológica en la galaxia. In: Lemarchand, G. A.; Tancredi, G. (eds.). *Astrobiología*: del Big Bang a las civilizaciones – Tópicos especiales en ciencias básicas e ingeniería, v. 1. Montevideo: Unesco, p. 321-349, 2010.

MacRobert, A. SETI Searches Today. *Sky and Telescope*, 2008. Disponível em: http://www.skyandtelescope.com/resources/SETI/3304561.html. Acesso em: 5 out. 2015.

Quillfeldt, J. A. Astrobiologia: água e vida no Sistema Solar e além. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 27, p. 685-697, 2011.

Sagan, C. *Contato*. São Paulo: Companhia de Bolso, 2008.

Webb, S. *If the Universe is teeming with aliens... Where is everybody?* Fifty solutions to the Fermi paradox and the problem of extraterrestrial life. Nova York: Copernicus, 2002.

FUTURO DA VIDA NA TERRA E NO UNIVERSO

CAPÍTULO 15

Douglas Galante, Gabriel Guarany de Araujo,
Marcio G. B. de Avellar, Rosimar Alves do Rosário,
Fabio Rodrigues e Jorge E. Horvath

A evolução da vida na Terra está, desde seu início, intrinsecamente ligada a eventos "evolutivos" astronômicos e planetários em nosso ambiente astrofísico, a começar pela região galáctica "privilegiada" na qual se encontra o Sistema Solar. Os elementos químicos em que a vida se baseia, e mesmo a abundância de cada um deles, é resultado de seus processos cósmicos de síntese, do Big Bang às estrelas, supernovas e raios cósmicos; a formação dos aglomerados de galáxias, das próprias galáxias e, por fim, dos sistemas planetários não é mais que um resultado da evolução natural da distribuição de massa no Universo; a disponibilidade de moléculas orgânicas na Terra primitiva é resultado dos processos químicos que ocorrem no meio interestelar, no disco protoplanetário e na superfície do próprio planeta, nos processos de química prebiótica. A origem da vida parece ser o simples resultado da combinação de todos os processos anteriores e da existência de

condições adequadas em nosso planeta, refletindo, assim, em última instância, apenas as leis matemáticas, físicas e químicas de nosso Universo (Pross, 2012).

Daquele momento inicial em diante, no qual o primeiro ser vivo emergiu do não vivo, toda a evolução da vida no planeta seguiu o processo de evolução darwiniana, respondendo, a cada instante, a processos interno-biológicos e externo-ambientais, fazendo que a biodiversidade florescesse e se estendesse por praticamente todos os ambientes do planeta, do fundo dos oceanos ao alto das montanhas e atmosfera – havendo um conjunto *mínimo* de condições, haverá vida.

Ao longo de seus quase 3,3 bilhões de anos documentados (de forma consensual) na Terra pelos cientistas, a vida passou por processos de extinção e especiação, às vezes com influência óbvia de eventos externos (Knoll, 2015). O fato é que a vida tem respondido às mudanças no ambiente do planeta, e muitas vezes são respostas às mudanças em nossa vizinhança astrofísica. E esse processo de resposta biológica continuará no futuro, conforme a evolução do Sol, de nossa atmosfera e do planeta como um todo, mesmo que novas extinções e especiações aconteçam, até que, em um futuro distante, atinjamos a total inviabilidade da vida na Terra, ao menos como a conhecemos.

Na Figura 15.1, apresentamos alguns dos eventos naturais que alterarão drasticamente as condições de nosso planeta e, provavelmente, influenciarão o curso da evolução biológica. No entanto, o processo de evolução não é determinístico; portanto, não podemos dizer como a vida irá responder a essas mudanças com certeza, e nem devemos ter essa pretensão. Muitas vezes, ao longo desses bilhões de anos, a vida apresentou soluções para situações aparentemente sem saída, e talvez isso volte a acontecer no futuro.

Apesar de muitas espécies terem se extinguido, cada extinção abriu nichos para novas espécies se estabelecerem desenvolvendo novas soluções evolutivas. Portanto, devemos enxergar esses processos como positivos e mesmo necessários para a manutenção, a longo prazo, da vida no planeta.

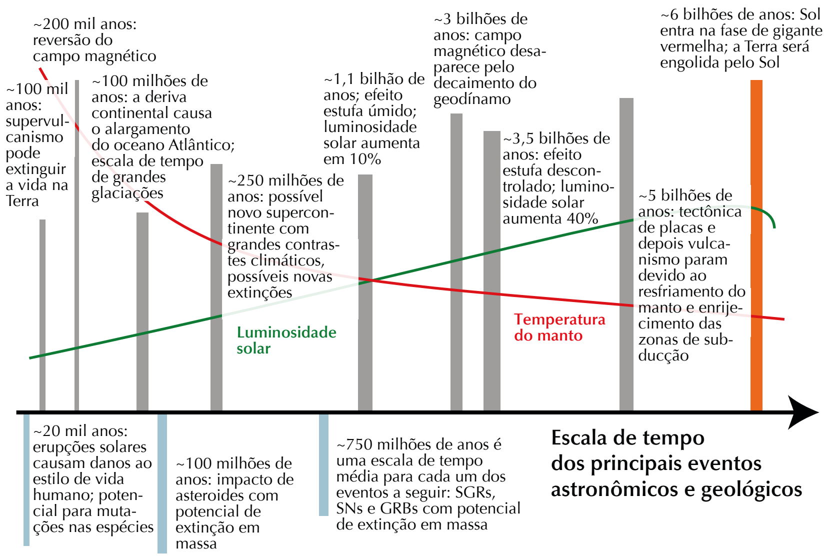


Figura 15.1. Escalas de tempo aproximadas para os eventos descritos no texto. Fonte: Adaptado de Pross (2012)

Para facilitar a discussão das escalas de tempo e da periodicidade dos eventos, separaremos, por ora, eventos em escala planetária de eventos em escala astronômica.

Eventos em escala planetária

O impacto dos supervulcões

Supervulcanismo é uma subclasse do vulcanismo, no entanto, de proporções muito maiores.

O cenário típico por trás desse tipo de vulcanismo é o de uma caldeira imensa, chegando a 50 quilômetros de diâmetro ou mais, sob a superfície, cheia de rocha derretida a altas pressões. O exemplo atual mais espantoso de um supervulcão se encontra sob o parque de Yellowstone, nos EUA, com um potencial para, no futuro, cobrir de lava boa parte do sudoeste norte-americano. Outros supervulcões são conhecidos na Califórnia, Nova Zelândia, Europa e Indonésia. Neste último país, o supervulcão Toba explodiu violentamente há 74 mil anos, com impactos globais mensuráveis, como

a diminuição da temperatura e extinções significativas da fauna e flora, incluindo, possivelmente, a quase extinção dos humanos.

A escala de tempo, ou periodicidade, de erupção de alguns supervulcões tem sido de cerca de 500 mil anos, mas levando-se em conta que há diversos espalhados pelo globo, o intervalo entre grandes erupções é bem menor, cerca de 100 mil anos. A erupção de um supervulcão pode lançar lava e detritos a uma altitude de 50 quilômetros de altura na atmosfera, fazendo que a vida sofra um grande impacto, em especial a macrofauna e flora, em um raio de milhares de quilômetros, cobrindo imensas áreas com lava.

A quantidade de poeira no céu poderia levar a um "inverno vulcânico" – diminuição da luz solar por um longo período de tempo, provocando quedas na temperatura da Terra. Além disso, com a diminuição da radiação solar, a fotossíntese pode ficar seriamente comprometida, com consequências para a cadeia alimentar dependente dos organismos fotossintetizantes (como ocorre em grande parte dos ecossistemas terrestres). Isso já foi observado em alguns eventos por meio de uma incursão negativa no δC_{13}, provavelmente associada à diminuição da produtividade biológica primária.

Registros de um evento desse tipo foram encontrados na região ártica do planeta, na Sibéria, e foi proposto como uma das possíveis causas para o maior evento de extinção em massa do planeta, a extinção do Permiano, há 250 milhões de anos (impactos de asteroides também são considerados uma hipótese alternativa ou complementar). Nesse evento, cerca de 95% de todas as formas de vida marinha e 70% da vida dos continentes anteriormente encontrada no registro fóssil desapareceu. Por exemplo, os trilobitas se extinguiram nesse evento, após quase 270 milhões de anos dominando os oceanos terrestres.

Essa grande extinção abriu caminho para a era dos dinossauros, com um subsequente aumento da biodiversidade no planeta.

O destino do campo magnético

Um dos primeiros processos geológicos em escala global que deve ocorrer é a reversão do campo magnético da Terra. Embora a reversão seja errática, sem período definido, dados das reversões

documentadas pelo estudo do paleomagnetismo (a última foi há 780 mil anos) sugerem um espaçamento temporal médio de 200 mil anos para esse fenômeno. O processo parece ser gradual, com uma diminuição da força do campo com o tempo, até um mínimo, voltando a aumentar em seguida, com sentido oposto.

O campo magnético é uma das proteções que temos contra a radiação na forma de partículas carregadas vinda do espaço (vento solar e raios cósmicos) e, ficando mais fraco, o planeta ficará vulnerável aos seus efeitos.

Apesar disso é possível que o campo residual já seja o suficiente para evitar grandes danos, sejam eles biológicos ou atmosféricos. Os impactos biológicos desse tipo de evento ainda são controversos, mas podemos imaginar que algumas espécies que usam o campo magnético como referencial geográfico sejam prejudicadas, e talvez alguns organismos expostos na superfície possam acumular doses de radiação mais elevadas, durante o período de diminuição/inversão do campo.

δC_{13}: Os átomos de carbono disponíveis na natureza existem em diferentes isótopos, ou seja, o mesmo elemento químico com diferente número de nêutrons. Em especial, existem 16 diferentes isótopos de carbono, de massa 8 a 23, mas apenas C^{12} e C^{13} são estáveis. Os processos biológicos que usam carbono ocorrem com maior eficiência para o isótopo estável mais leve, C^{12}, portanto, a matéria orgânica (de origem biológica) costuma apresentar um ligeiro enriquecimento natural nesse isótopo em relação à matéria inorgânica – a cada 1.000 átomos de carbono, ela tem 25 a mais de C^{12}, um número que pode ser medido em laboratório. Quando dizemos que ocorreu uma incursão negativa no δC^{13} estamos dizendo que a proporção de átomos C^{13} para C^{12} foi inferior ao de um determinado padrão, o que, em geral, indica que menos C^{12} estava sendo sequestrado da atmosfera pelos produtores primários (organismos fotossintetizantes). O caso contrário, em geral, está associado ao aumento da atividade de fotossintetizantes – por exemplo, no caso de aumento ligeiro da temperatura de algumas regiões.

O fato é que a Terra já passou por reversões magnéticas e a vida continuou, mas é interessante se perguntar quais os impactos biológicos desses eventos, mesmo sendo improvável uma extinção em massa.

Muito mais adiante no futuro, em algum momento ainda impreciso, a Terra perderá seu campo magnético de maneira definitiva, o que será muito mais grave.

Sem sua magnetosfera, a atmosfera terrestre receberá o impacto direto das partículas do vento solar e dos raios cósmicos (Figura 15.2), sendo lentamente degradada e perdida para o espaço, em um processo similar ao que aconteceu em Marte. Isso ocorrerá por uma série de fatores interligados, começando no núcleo sólido do planeta. Ao contrário do que muitas vezes nos foi ensinado, o campo geomagnético não é gerado por depósitos de material magnético no planeta (um grande imã subterrâneo), mas sim por um processo de dínamo eletromagnético, onde cargas elétricas em movimento geram o campo magnético, como em um eletroímã.

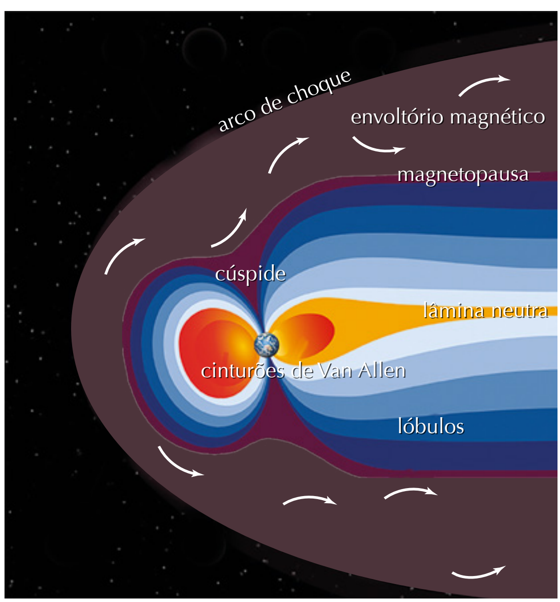


Figura 15.2. A magnetosfera terrestre forma um escudo protetor ao redor do planeta, evitando que partículas de alta energia do vento solar e raios cósmicos atinjam a superfície e destruam a atmosfera. Fonte: Adaptado de Dennis Gallagher / Wikimedia Commons

A fonte desse campo é a interface entre o núcleo sólido e o núcleo líquido da Terra, uma região onde o material que compõe o planeta está altamente aquecido, parcialmente ionizado e se movimentando rapidamente, como resultado da rotação do planeta, da hidrodinâmica do material e de processos caóticos locais. O movimento é variável com o tempo, o que resulta em um campo não estático (que podemos acompanhar nos mapas geográficos, nos quais as linhas de declinação magnética têm de ser atualizadas de tempos em tempos – os polos magnéticos mudam de posição).

À medida que a Terra perde calor e seu interior se resfria, o núcleo interno sólido aumenta de tamanho, sendo acrescido pela solidificação do núcleo externo líquido. Embora conheçamos a termodinâmica, não sabemos ao certo as temperaturas no interior da Terra nem os mecanismos dominantes na transferência de calor (por exemplo, convecção ou condução). Acredita-se que, atualmente, a convecção domine a transferência de calor no entorno do núcleo, mas conforme o manto se resfria, a convecção pode cessar, e a condução passaria a ser o mecanismo dominante. Isso poderia desligar o geodínamo e, consequentemente, o campo magnético terrestre. Enquanto isso, no manto (viscoso na escala de tempo geológica), a convecção (e, portanto, a tectônica) poderia continuar sendo efetiva por ainda cerca de 3 bilhões de anos.

Deriva continental e tectônica de placas: mudando a face da Terra

Em uma escala de tempo de centenas de milhões de anos, os continentes passam por grandes mudanças em sua organização, ora juntos, formando supercontinentes como os antigos Rodínia, Gondwana e Pangeia, ora separados, como atualmente.

Esse movimento, chamado deriva continental, é causado pelo fato de a crosta terrestre, sólida, ser feita de placas separadas que boiam sobre o manto que tem movimentos gerados principalmente por convecção do material.

Por uma combinação dos efeitos do movimento de convecção do manto, rotação da Terra, peso da própria crosta, sucção nas

zonas de subducção e outros, as placas são arrastadas ao longo do tempo, de uma maneira difícil, senão impossível, de predizer, modificando a organização dos continentes e trazendo consequências globais para o clima e para a vida.

A variação na distribuição dos continentes altera, por exemplo, as correntes marinhas, que sabemos terem grande influência no clima. O aumento de massas de terra na região dos continentes também diminui o albedo do planeta (que é a refletividade da superfície – quanto mais escuro, menor o albedo, e mais radiação solar a superfície absorve), podendo assim aumentar a temperatura global.

O caso contrário também é válido – se os continentes se concentrarem na região polar, que recebe normalmente menos luz, as temperaturas do planeta tendem a diminuir.

Assim, o clima global é altamente dependente do movimento dos continentes, bem como o clima local, pois um supercontinente tem, em geral, um grande deserto em seu interior, por causa da distância das massas de água, enquanto vários continentes menores são mais úmidos. Dessa maneira, os habitats disponíveis no planeta foram diferentes em momentos diferentes da história geológica.

Além disso, durante o processo de tectonismo, o fundo oceânico é reciclado constantemente em uma escala de tempo de cerca de 100 milhões de anos. Novo material é expelido nas cristas meso-oceânicas (como a que existe no oceano Atlântico), empurrando o fundo oceânico em um ritmo de alguns centímetros por ano para as laterais da crista, literalmente abrindo o oceano.

Ao ser formado, esse fundo oceânico possui cerca de dez quilômetros de espessura e, conforme segue se resfriando, aumenta de espessura chegando até centenas de quilômetros, quando afunda em direção ao manto nas zonas de subducção, gerando as regiões mais profundas que conhecemos, como a Fossa das Marianas. Esse processo de reciclagem é extremamente importante, pois é fundamental no ciclo do carbonato-silicato, o qual é responsável, em parte, pela estabilização da temperatura do planeta.

Organismos vivos, ao sequestrarem o carbono da atmosfera (na forma de CO_2, para a fotossíntese), em especial organismos marinhos, acabam diminuindo a quantidade desse gás na atmosfera. Como o CO_2 é um dos causadores do efeito estufa que mantém a temperatura da Terra (nem todo efeito estufa é ruim, se não fosse por esse efeito, nosso planeta seria cerca de 20 °C mais frio), a diminuição sem controle do gás na atmosfera poderia levar rapidamente a uma glaciação global. No entanto, conforme os organismos morrem e caem no fundo oceânico, esse carbono é levado para o manto, reciclado pelas altas temperaturas e expelido pelos vulcões, retornando assim para a atmosfera. Dessa maneira, a concentração do gás na atmosfera permanece constante com o tempo.

A deriva continental parece ter também papel importantíssimo na evolução da vida do planeta, e talvez seja mesmo necessária para seu surgimento, evolução e manutenção no planeta. Conforme a configuração geográfica da Terra varia com o tempo, populações de organismos são expostas a diferentes condições e pressões seletivas; algumas vezes são divididas e isoladas por longos períodos e depois novamente reunidas. Esses processos são importantes para que ocorram os eventos de especiação e extinção, e talvez, sem eles, não houvesse a biodiversidade que hoje encontramos em nosso planeta.

Apesar de o fenômeno de deriva ser gradual e constante, grandes mudanças acontecem quando ocorrem separações ou encontros de placas e continentes, sendo razoavelmente regulares, na escala de centenas de milhões de anos. A própria separação da Pangeia ocorreu, aproximadamente, na mesma época da extinção do Permiano, sendo que alguns cientistas propõem que haja uma correlação entre os dois eventos, talvez pela diminuição da produtividade primária (atividade de organismos fotossintetizantes) e pela mudança da configuração das áreas costeiras nesse período.

Por esse motivo, apesar de a tectônica de placas poder causar grandes extinções, ela parece ser um item importante para garantir a habitabilidade de um planeta. No entanto, mesmo na Terra ela não será eterna – com o resfriamento do interior do planeta, talvez

pelos próximos 5 bilhões de anos a mobilidade das placas irá diminuir até que esse movimento cesse por completo e, com ele, a reciclagem do fundo oceânico, do carbono atmosférico e a criação de novas grandes barreiras geográficas. Essa nova realidade certamente irá criar grandes desafios para a vida e eventualmente uma nova grande extinção.

O aquecimento global

Apesar de nosso Sol estar em um período de estabilidade em sua evolução, conhecido como sequência principal, ele continua mudando, e grandes alterações climáticas são esperadas nesse processo.

Nossa atmosfera possui muitos tipos de gases do efeito estufa, sendo os principais o vapor de água, o dióxido de carbono (CO_2) e o metano (CH_4). O princípio do efeito estufa aqui na Terra é que o equilíbrio entre a radiação absorvida (no visível) e emitida (no infravermelho) pelo planeta de volta ao espaço é quebrado. Isso acontece porque esses gases absorvem a radiação infravermelha da superfície terrestre, e a reemitem, fazendo a temperatura aumentar, mas o fluxo emitido para o espaço diminui ou fica constante.

Uma teoria razoavelmente bem estabelecida é a teoria do efeito estufa descontrolado. Conforme a superfície esquenta, a atmosfera se torna mais densa com vapor de água, o que limita a quantidade de radiação térmica que pode ser emitida para o espaço. Assim, a temperatura superficial aumenta muito. Em termos práticos, para que esse efeito seja acionado, o fluxo de radiação emitido em infravermelho deve ser maior que certo limite, chamado troposférico, calculado, em um modelo simples, em cerca de 290 W/m^2 (atualmente a Terra emite cerca de 240 W/m^2).

Ponto interessante é que a adição de CO_2 não leva diretamente ao aumento desse fluxo, a despeito dos intensos debates sobre a ação humana no aumento da concentração desse gás. O mais importante para o efeito estufa parece ser o vapor de água: conforme a superfície esquenta, mais vapor de água é liberado dos oceanos para a atmosfera, e mais absorção da radiação

infravermelha por esse gás acontece, aumentando ainda mais a temperatura.

Em um modelo simples, mantendo as condições da Terra atual, o efeito descontrolado começaria quando a temperatura da superfície atingisse cerca de 325 K ou 52 ºC (lembrando que a temperatura média da Terra atual é 15 ºC).

Dependendo apenas da evolução do Sol, especula-se que esse ponto está há cerca de 3,5 bilhões de anos no futuro, quando o Sol tiver aumentado sua luminosidade cerca de 50%. Uma das consequências desse tipo de efeito estufa é a evaporação total dos oceanos, mas não imediatamente: o aumento de vapor de água na atmosfera causará, em um primeiro momento, o aumento do ponto de ebulição da água. Teremos água líquida até que a temperatura atinja o valor crítico de 647 K ou 374 ºC. A maior parte da vida da superfície pode estar perdida nesse momento, e se alguma vida marinha conseguir se adaptar a essas temperaturas, não será por muito tempo. A partir desse ponto, a temperatura fará que os oceanos se evaporem, e a Terra provavelmente ficará totalmente estéril. O vapor de água na atmosfera, por efeito da radiação, sofrerá fotodissociação, e a água será perdida para o espaço. Esse aquecimento global desenfreado cessará quando a temperatura atingir 1.400 K ou 1.127 ºC, uma nova janela de equilíbrio radiativo. Mas, nesse ponto, nosso mundo estará novamente sendo coberto por oceanos de magma.

Se tudo isso parece um futuro apocalipse inexorável, é preciso ficarmos atentos para um estado climático intermediário chamado efeito estufa úmido, que pode acontecer bem antes (isso mudaria um pouco o efeito descontrolado, principalmente no quesito "início a uma dada temperatura"), com escala de tempo estimada em 1,1 bilhões de anos, quando o Sol tiver aumentado 10% sua luminosidade.

No efeito estufa úmido, o vapor de água é o maior constituinte da troposfera, e a estratosfera torna-se mais úmida. A tropopausa, camada entre a troposfera e a estratosfera, move-se para cima, elevando-se conforme a temperatura aumenta. Esse tipo de efeito

estufa, entretanto, é estável, embora suas consequências sejam drásticas para a vida.

Três consequências iniciais forçarão a vida a se adaptar: enfraquecimento do gradiente de temperatura latitudinal (degelo) e consequente mudança da circulação atmosférica; mudança na química da estratosfera; destruição da camada de ozônio, entre outras coisas, por radicais livres advindos da quebra das moléculas de água.

Caso consigamos evitar, usando a geoengenharia, por exemplo, esse destino de efeito estufa intermediário, lembremos que o efeito estufa descontrolado pode ser inevitável e outros eventos em escala planetária acontecerão com potencial para extinguir a vida na Terra.

Eras glaciais: na solidão do gelo

Eras glaciais são eventos nos quais a Terra tem uma brutal queda de temperatura, recobrindo uma grande parte da superfície do planeta com gelo e neve (teoria da Terra bola de neve). No último bilhão de anos, a Terra passou por seis períodos documentados como esse, com uma frequência temporal estimada em cerca de 150 milhões de anos. São períodos de frio intenso com pouca variação climática que podem durar milhões de anos.

Também estão relacionadas com os maiores eventos de extinção em massa na história da Terra, extinguindo muitas famílias e gêneros de organismos, em uma espécie de reação em cadeia: quando o gelo recobriu os oceanos até muito perto da Linha do Equador, os organismos fotossintetizantes marinhos foram muito prejudicados, já que a luz solar fora bloqueada. Como a fotossíntese é a base de grande parte das cadeias alimentares terrestres, um bloqueio da luz solar diminui muito a quantidade de energia disponível para a vida. Essa diminuição brutal na produtividade orgânica é vista no registro geológico como uma incursão negativa no δC^{13} (ver Quadro), e pode estar relacionada com o desaparecimento de espécies que necessitam de grande aporte de energia. Além disso, os eventos

de glaciação podem estar relacionados a grandes variações nos níveis oceânicos e nas correntes marinhas, eventos que podem modificar profundamente o clima, a química e a biologia do planeta, em uma escala de tempo muito rápida. As causas das eras glaciais não estão totalmente estabelecidas, mas diversos fatores contribuem para seu início: além de ciclos solares, contribuem também mudanças no eixo e órbita da Terra, conhecidas como ciclos de Milankovitch, movimentação de placas tectônicas, expulsão de particulados pelos grandes vulcões ou impactos de meteoros que bloqueiem a luz solar, além de mudanças na composição da atmosfera. Mesmo eventos de aquecimento global podem gerar glaciações, pois com o aquecimento há um aumento nas precipitações – tanto de chuva quanto de neve – e nas áreas cobertas por neve, o que aumenta o albedo do planeta, a reflexão da luz solar e diminui a quantidade de calor preso na superfície. Como se pode ver, há muitos parâmetros envolvidos na geração de um evento de glaciação, o que os tornam muito difíceis de prever.

A última dessas grandes eras glaciais ocorreu há cerca de 60 milhões de anos, pouco depois da extinção dos dinossauros. Além dessas grandes eras glaciais, ocorreram na Terra pequenos períodos glaciais, nos quais a temperatura caiu e uma camada de gelo e neve cobriu parte da superfície da Terra. Esses períodos têm escala de tempo de 50 a 100 mil anos e podem durar poucos milhares de anos. O último desses períodos ocorreu há 20 mil anos, tendo durado aproximadamente 8 mil anos. Esses eventos menores normalmente não foram associados a grandes eventos de extinção, mas podem causar grande estresse biológico nos organismos, principalmente nos que vivem na superfície.

Eventos de escala astronômica

Explosões estelares

Talvez tão importante quanto o impacto de meteoros são os efeitos de eventos astrofísicos de alta energia, muito menos conhecidos: as

explosões de supernova, os surtos de raios gama e os soft gamma repeaters, além das erupções solares. Esses quatro tipos de surtos explosivos de radiação vindos do espaço podem causar sérios danos à vida na Terra e até mesmo podem ter tido papel importante em eventos de extinção em massa, uma vez que podem ter um efeito ionizante na atmosfera, alterando profundamente sua química.

Em termos gerais, essa radiação quebraria a ligação N_2, que compõe cerca de 80% da atmosfera. Nesse processo, muitos tipos de óxidos de nitrogênio, NO e NO_2, por exemplo, seriam formados, os quais ativariam uma reação catalítica que transformaria o ozônio (O_3), principal absorvedor de radiação ultravioleta (UV), em oxigênio comum (O_2). Torna-se evidente porque a depleção do ozônio é catastrófica: grande parte da vida conforme a conhecemos evoluiu nos últimos 540 milhões de anos (após o evento do rápido aumento de diversidade biológica, conhecido como Explosão do Cambriano), na atual era geológica chamada Fanerozoico. Essa evolução ocorreu em um tempo em que a atmosfera já estava "protegida" contra os efeitos da radiação. A vida atual é adaptada a essas condições, tendo a radiação UV perigosos efeitos sobre importantes moléculas biológicas, como o DNA e as proteínas em geral.

Para termos uma ideia mais clara da energia liberada nesses surtos de radiação, vamos colocar a energia média desses eventos em termos da energia liberada na explosão da bomba atômica de Hiroshima (10^{20} erg). As erupções solares liberam cerca de 10^{33} erg de energia ou, aproximadamente, 10 bilhões (10^{10}) de bombas de Hiroshima. O próximo na escala é a explosão de supernova, que libera cerca de 10^{51} erg. Isso equivale a 10 bilhões vezes 10 bilhões vezes 10 bilhões (ou 10^{30}) da energia daquela bomba. Ainda mais energéticos, os surtos de raios gama liberam 10^{51} erg ou 10^{28} Hiroshimas, e são os eventos mais energéticos do Universo desde o Big Bang.

Entretanto, sem alarde. Em primeiro lugar, a quantidade de energia que chega à Terra depende da distância. Em segundo, esses eventos são raros mesmo em escala geológica.

Começando pelas erupções solares, esses surtos são formados principalmente por prótons (os núcleos dos átomos de hidrogênio do qual o Sol é feito) acelerados a grandes energias pelo campo magnético estelar. Essas partículas são defletidas pelo campo magnético terrestre, causando o efeito visível das auroras nos polos, pela interação com a atmosfera.

O fato de termos um campo geomagnético e uma atmosfera acaba por proteger a vida na superfície do impacto da radiação. A vida nos oceanos e sob o solo também recebe proteção pela blindagem conferida por esses materiais, para a maioria dos tipos de partículas que atinge o planeta.

Apesar de, biologicamente, essas ejeções de prótons não serem diretamente preocupantes para a sobrevivência da vida no planeta, pela proteção atual natural, elas podem afetar a sociedade tecnológica atual e futura.

Em órbita e além da magnetosfera, nossos satélites e astronautas estão sujeitos a seus efeitos deletérios (esse é um dos grandes empecilhos para uma viagem tripulada para Marte, por exemplo). Na própria Terra, nossas linhas de transmissão de energia e de informação podem atuar como grandes antenas, absorvendo a energia das explosões solares e causando apagões em grande escala, como já aconteceu no Canadá em 1989, quando toda a província de Quebec ficou sem energia por causa de uma tempestade solar.

Acreditamos que efeitos biológicos causados por explosões solares de grande magnitude possam ser ou tenham sido importantes em situações como a que se encontrava a Terra primitiva (quando a atmosfera era mais tênue, tendo densidade aproximadamente 10 vezes menor que a atual), nas situações de reversão do campo magnético e no futuro, quando o campo geomagnético terrestre entrar em declínio.

Já os soft gamma repeaters são eventos associados ao campo magnético ultraforte de algumas estrelas de nêutrons, que se torce com a rotação estelar, acumulando energia que é liberada ocasionalmente em grandes explosões. A energia emitida equivale ao total irradiado pelo Sol em um milhão de anos, apenas em raios

gama, radiação mais energética que os raios X. Um dos principais efeitos desses surtos é secundário, na verdade. É o efeito conhecido como *flash de ultravioleta*, resultado do reprocessamento dos fótons de alta energia na atmosfera superior, que atinge todo um hemisfério do planeta com um intenso e rápido fluxo de luz UV. Além de ser diretamente deletéria para a vida, a radiação causa alterações químicas na atmosfera, como a depleção da camada de ozônio, o que faz aumentar, por consequência, também o fluxo de radiação solar chegando à superfície. Estudos sugerem que um surto desses a 10 pc de distância (aproximadamente 32 anos-luz) poderia causar uma mortalidade de 90% mesmo no organismo mais resistente à radiação conhecido, a bactéria *Deinococcus radiodurans*. Entretanto, os efeitos sobre toda a biota ainda precisam ser mais estudados, pois as relações ecológicas podem tornar a vida mais resistente que espécies isoladas. Além disso, a estatística não favorece a ocorrência desses surtos nas proximidades da Terra: a distâncias menores que 20 pc, a ocorrência estimada é, grosso modo, uma a cada 5 bilhões de anos (maior que a idade da Terra); e a 50 pc, a taxa de ocorrência estimada fica em torno de uma a cada 2 bilhões de anos.

Supernovas são conhecidas explosões estelares que marcam o fim da vida de uma estrela massiva, com ocorrência de uma ou duas por século em nossa galáxia. Esses eventos produzem uma grande emissão de radiação X, aceleram partículas carregadas a altas energias e, estando suficientemente próximos, produzem uma onda de choque que poderia varrer a superfície de um planeta. Talvez o efeito mais danoso, se considerarmos as escalas astronômicas no Universo, seja o das partículas aceleradas pela explosão: esses raios cósmicos podem quebrar moléculas de nossa atmosfera e criar outras, alterando sua química. Do ponto de vista biológico, provavelmente o maior dano causado seja a destruição do ozônio, que pode perdurar por anos depois da supernova. Os efeitos dos raios X são mais difíceis de prever, pois os espectros das supernovas são muito variados e mais estudos ainda são necessários para entender o impacto biológico dessas explosões astrofísicas. Com

uma taxa de ocorrência próxima a nosso planeta de uma ou duas a cada bilhão de anos, elas talvez sejam os eventos astrofísicos de alta energia com maior impacto para a vida no planeta. No entanto, é interessante pensar que esses eventos, ao mesmo tempo que podem causar um grande dano, também distribuem os elementos químicos produzidos no interior das estrelas pelo Universo, permitindo a formação de planetas e o aumento da complexidade química em suas superfícies, possibilitando assim a origem e evolução de vida como a conhecemos.

Por fim, talvez os mais perigosos sejam os surtos de raios gama, pois são as maiores explosões do Universo desde o Big Bang, emitindo uma quantidade imensa de energia na forma de radiação gama, concentrada em um cone, como um farol varrendo o Universo. Um planeta que estivesse exatamente nesse cone sofreria vários efeitos, dependendo da distância até a fonte da explosão, que poderiam ser mais intensos que todos os apresentados até agora. A radiação gama direta seria, em grande parte, absorvida pela atmosfera, mas poderia varrê-la para o espaço ou, no mínimo, alterar profundamente sua química, destruindo ozônio e gerando óxidos de nitrogênio que, a longo prazo, poderiam causar o resfriamento de todo o planeta. Parte dessa radiação seria transformada em luz ultravioleta, em uma quantidade muito maior que a produzida pelo Sol, o que poderia causar danos profundos aos organismos expostos vivendo na superfície, no ar e nos primeiros metros sob as águas, afetando profundamente os organismos fotossintetizantes, a base da cadeia alimentar do planeta. Apesar de os surtos de raios gama serem pouco frequentes no Universo, eles podem causar danos planetários a distâncias realmente astronômicas: mesmo do outro lado da galáxia eles poderiam ser perigosos se o farol de raios gamas estiver apontado exatamente em sua direção. Vale salientar que esse tipo de alinhamento pode já ter ocorrido para a Terra, com taxa estimada de uma vez a cada bilhão de anos, mas ainda estamos aprendendo a buscar as provas de que passamos por isso no registro geológico e biológico.

Impacto de meteoros

Eventos astronômicos como a queda de asteroides representam ameaça mais imediata. Já aconteceu antes, ao menos uma vez, na grande extinção dos dinossauros, no período Jurássico, cerca de 65 milhões de anos atrás (apesar de existirem hipóteses alternativas). Na ocasião, acredita-se, um asteroide de aproximadamente 10 quilômetros de diâmetro caiu onde hoje é o golfo do México. O impacto foi tão grande que lançou toneladas de poeira na atmosfera, bloqueando a passagem da luz solar e impedindo a fotossíntese, o que resfriou a temperatura na superfície. Esse evento, e outros similares antes dele, contribuíram no processo evolutivo, mudando as relações ecológicas que prevaleciam até então, extinguindo predadores e abrindo espaço para o aumento de populações que antes eram muito mais limitadas, como a dos mamíferos. O impacto de asteroides acontecerá novamente e os potenciais danos à vida são, de certa forma, imprevisíveis. A curto prazo, essa é a ameaça de extinção em massa mais provável, ao lado de supervulcanismo, deriva continental e eras glaciais. Esses fenômenos talvez tenham contribuído para vários dos eventos de extinção da história do planeta e continuarão atuando no futuro. Em relação a impactos, a escala de tempo para eventos de extinção em massa, como o dos dinossauros, é de cerca de 100 milhões de anos. Entretanto, a Terra é constantemente bombardeada por meteoritos. A queda de objetos pequenos ainda assim pode causar danos e prejuízos enormes à sociedade humana: a atmosfera terrestre nos protege de impactos com o poder destrutivo de uma bomba atômica uma vez por ano, em média, mas um meteoro relativamente pequeno, com cerca de 1 km de diâmetro, atingindo uma área povoada, como São Paulo, poderia causar milhões de mortes.

O futuro da vida e as grandes extinções

A vida é um fenômeno que ainda não compreendemos completamente: não sabemos como ela surgiu no planeta e estamos ainda aprendendo o que ela precisa para existir e como evolui com o

tempo. Há um longo caminho pela frente, mas sabemos algo tão importante quanto impactante: é um fenômeno muito persistente, tendo resistido a vários eventos catastróficos na Terra. Esterilizar todo o planeta talvez seja praticamente impossível, mesmo para os eventos de altíssima energia, geológicos e astronômicos, pois há vida em quase todos os lugares que podemos imaginar da Terra. Talvez apenas se toda nossa crosta novamente derreter, seja por um gigantesco impacto, como o que formou a Lua, seja pelo aquecimento do Sol no futuro, a vida no planeta seria realmente exterminada.

Ou seja, a vida em nosso planeta deve continuar existindo ainda por muito tempo, mas claro, sempre mudando – evoluindo. Espécies se extinguirão e outras surgirão em seu lugar, em um ciclo constante e necessário para a manutenção da biodiversidade. Estudando nosso registro fóssil, como mostrado na Figura 15.3, vemos que esse processo de surgimento e desaparecimento de espécies é inerente à vida, e talvez mesmo necessário para sua continuidade. Na figura, podemos ver que, depois de cada uma das grandes extinções, o número de espécies ou grupos retornou ao seu número inicial ou ainda, em alguns casos, aumentou.

A geologia divide a história da Terra em grandes intervalos de tempo. O maior e mais antigo é o Pré-Cambriano, que inclui eventos como a formação do planeta e o surgimento da vida. Na sequência, vem o Fanerozoico, caracterizado pela abundância de registros fósseis de vida animal e compreende até a atualidade. Nos 540 milhões de anos que abrange, os animais se diversificaram de organismos estruturalmente simples para várias formas mais intrincadas. A crescente biodiversidade é indicada pelo aumento no número de fósseis diferentes dos estratos geológicos mais antigos até os mais novos. Uma análise cuidadosa revela que, em certos pontos do tempo, a variedade biológica caiu bruscamente, com várias formas de vida desaparecendo de maneira simultânea. Essa é a marca de um evento maciço que devastou boa parte da biosfera global – uma extinção em massa.

Os principais eventos desse tipo foram identificados como as “cinco grandes extinções” que marcaram o Fanerozoico.

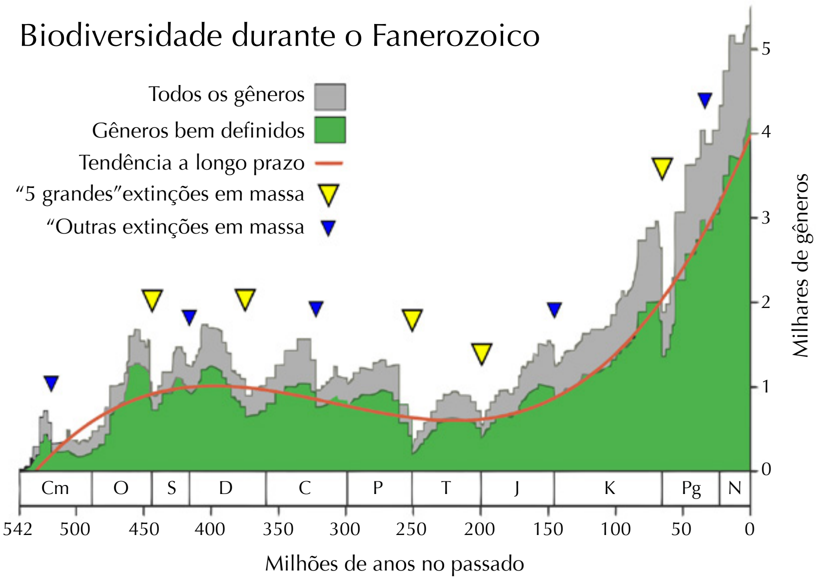


Figura 15.3. Número de espécies em relação às eras geológicas e suas subdivisões. Fonte: Wikimedia Commons

Cronologicamente, estão espalhadas entre suas subdivisões, denominadas períodos. Os dois primeiros períodos são respectivamente o Cambriano e o Ordoviciano, quando a vida animal primitiva ainda estava restrita a ambientes marinhos. Estavam presentes já os moluscos, equinodermas (como as estrelas-do-mar) e os artrópodes (como os trilobitas). O final do Ordoviciano é definido com a primeira grande extinção, decorrente de uma glaciação, formando grandes geleiras, o que causou a queda no nível do mar. Como é justamente na plataforma continental, na água mais rasa, em que a maioria da fauna deste período existia, os efeitos sobre a vida foram severos. Gatilhos propostos para isso incluem a desregulação do ciclo do carbono pelas primeiras briófitas (plantas avasculares) e a incidência de um surto de raios gama no planeta, mas os motivos reais ainda são controversos e debatidos na literatura.

Os períodos seguintes foram o Siluriano e o Devoniano. A colonização dos continentes se iniciou pelos artrópodes, enquanto

os vertebrados marinhos se destacaram com uma grande variedade de peixes. Ao final do Devoniano, outra extinção aconteceu por motivos semelhantes à última – mudanças climáticas e queda no nível do mar. Causas, ainda debatidas, para o fato envolvem a diversificação das plantas vasculares terrestres que desbalancearam o teor de CO_2 na atmosfera ou o impacto de um asteroide.

No Carbonífero, grandes florestas cobriram a terra firme, sob as quais os anfíbios são o grupo pioneiro de vertebrados a deixar o ambiente aquático. Seguindo para o Permiano, um evento importante ocorreu – a formação do supercontinente Pangeia, composto por quase todas as massas continentais atuais. A maior extinção de todas aconteceu no final desse período, há 250 milhões de anos. Aproximadamente 95% das espécies marinhas e 75% das terrestres, como estimado pelo desaparecimento de múltiplas formas de vida do registro fóssil, incluindo os últimos trilobitas. Muitas causas possíveis para isso foram propostas, e o que parece mais provável é que muitas delas tenham ocorrido em conjunto para explicar a dimensão do evento. Os principais fatores teriam sido um excesso de gás carbônico na atmosfera, somado à acidificação e anoxia nos oceanos. Os motivos mencionados para o fenômeno: um dilúvio de basalto (vulcanismo intenso) que ocorria na Sibéria, impactos de cometas ou asteroides, eventos astrofísicos de alta energia e até a proliferação descontrolada de um grupo de micro-organismos que produzem gás metano.

No Triássico, durante a lenta recuperação da última devastação, surgiram os primeiros dinossauros, que viriam a dominar o planeta pelas dezenas de milhões de anos seguintes. A Pangeia começa a se desintegrar, em um demorado processo que levaria à formação dos continentes atuais. Outra grande extinção ocorreu no final do período, causada por mudanças climáticas semelhantes às que ocorreram no final do Permiano, mas com efeitos menores. O provável causador foi um evento de dilúvio de basalto que ocorreu bem no centro do supercontinente que se desfazia; os sinais desse vulcanismo estão nos remanescentes da chamada Província Magmática Centro-Atlântica, hoje espalhada pelas Américas e pela África.

O Jurássico se inicia, surgem os primeiros mamíferos sob a supremacia dos grandes répteis. Isso segue até o Cretáceo, que se encerra com a extinção mais famosa de todas, 65 milhões de anos atrás. Notoriamente, o reino dos dinossauros chega ao fim, ainda que sua dizimação não tenha sido completa, e seus herdeiros diretos, as aves, existam até a atualidade. A principal causa provavelmente foi o impacto de um asteroide onde hoje é a península de Yucatán, no México, local em que foi encontrada a cratera de Chicxulub, submarina, com mais de 180 km de diâmetro. A colisão teria liberado uma grande quantidade de material particulado na atmosfera, causando mudanças climáticas e afetando os produtores primários dependentes da luz solar. Os organismos maiores então pereceram com o colapso da cadeia alimentar. Outro fator que estava presente, menos conhecido, foi mais um evento de vulcanismo intenso, agora na região do Decão, na Índia, que também teria afetado o clima global. Após esta última (mas não final) devastação, os nichos ecológicos antes ocupados pelos dinossauros foram disponibilizados para os mamíferos, que se diversificaram pelo planeta nas eras seguintes. A biosfera moderna é consequência direta de todos esses eventos, mas esta não é uma história acabada, apenas os participantes foram renovados – entre eles, os humanos.

A evolução do Sol: o apocalipse definitivo

O fim inexorável da vida na Terra provavelmente virá concomitantemente aos estágios finais da evolução do Sol. Pelos próximos 5 bilhões de anos, nossa estrela consumirá o hidrogênio em seu núcleo, formando hélio e liberando energia. Simulações computacionais sugerem que pelos próximos 2 bilhões de anos, o Sol, à medida que consumir o hidrogênio de seu núcleo, aumentará sua luminosidade e temperatura sem, no entanto, aumentar muito seu tamanho.

Entretanto, assim que as reações nucleares no núcleo do Sol tiverem consumido cerca de 10% da massa do hidrogênio presente, nossa estrela entrará em uma nova fase de evolução, saindo

do que chamamos de sequência principal, na qual esteve pelos últimos 5 bilhões de anos, aproximadamente. Começará então a fase de gigante vermelha, quando o Sol aumentará de tamanho, ultrapassando a órbita da Terra, engolindo-a. Mesmo antes disso, o fluxo radiativo que incidirá sobre a superfície será tão intenso que ela mais se parecerá com uma bola incandescente, muito similar ao que foi no início de sua história. Esse é o ponto final da vida em nosso planeta. Mas quem sabe se a vida não florescerá onde hoje nos parece impossível, como nas luas geladas dos planetas gigantes? Ou mesmo na superfície fria de Marte, que se tornará mais quente e talvez com uma maior atividade de água líquida?

Qual o futuro final da vida? Pelo que conhecemos sobre o processo de evolução biológica, é impossível prever. A única certeza que temos é que a vida se modifica com o tempo e com o ambiente, e acaba por modificá-lo também. Enquanto houver condições mínimas em nosso planeta e no Universo, a vida e sua evolução devem continuar, talvez apenas terminando quando todas as fontes de energia disponíveis se esgotarem, como as estrelas, os radionuclídeos e as fontes gravitacionais.

Efeito da ação humana

Atualmente, fala-se muito dos efeitos ecológicos, com a interferência ou não do homem, para o futuro da vida na Terra. Debate-se muito, ainda sem grande consenso, os efeitos do ser humano no aquecimento global e em outras alterações globais. No entanto, a Terra já passou por períodos mais quentes e mais frios, e a vida continuou. É importante termos em mente que o *Homo sapiens* é apenas mais uma espécie no planeta, parte de uma rede ecológica complexa, imprevisível e, ao que parece, bastante robusta. Mas somos capazes de induzir grandes alterações no planeta e também na biosfera. Nossa influência em alguns ecossistemas, desde a destruição de habitats naturais para propósitos especificamente humanos até mudanças climáticas locais (talvez até mesmo globais) causadas pelo nosso progresso tecnológico podem causar uma diminuição na

biodiversidade e a extinção de muitas espécies, culminando no que hoje começa ser aceito como uma nova extinção, a do período do Holoceno. O impacto final das atividades humanas é incerto, mas não somos a primeira espécie a criar mudanças globais: por exemplo, o surgimento dos organismos fotossintetizantes no planeta, cerca de 2 bilhões de anos atrás, oxigenou a atmosfera, causando uma extinção em massa que varreu os organismos anaeróbios da superfície do planeta. É possível que estejamos criando um novo cataclismo global pelo aumento da temperatura, e é nosso maior interesse como espécie evitar esse tipo de evento, por representar um potencial desafio para nossa sobrevivência. No entanto, mesmo que cause nossa extinção, um evento de aumento de temperatura ou mesmo de congelamento global provavelmente não causaria a extinção de todas as formas de vida no planeta.

O fato é que ainda precisamos aprender muito sobre o funcionamento da evolução e as intrincadas relações ecológicas entre os seres vivos se quisermos ter alguma chance de prever a resposta da vida a mudanças em nosso planeta, sejam elas causadas pelo homem, geológicas ou astronômicas. Essa é uma linha de pesquisa que está apenas em seu início, mas é um fato que a vida como conhecemos está intrinsecamente conectada a seu ambiente, respondendo a mudanças e causando mudanças. Conhecermos nosso lugar nessa rede complexa certamente nos ajudará a compreender os impactos da atividade humana e a delinear nossas ações e o uso de nossa tecnologia para garantir nossa permanência e a de nosso ambiente planetário.

Para onde a evolução levará a vida? É muito difícil, senão impossível responder. A única certeza que temos é que a vida é muito resistente: enquanto nosso planeta tiver condições mínimas, a vida deve continuar e talvez se estenda até o final dos tempos, quando o Universo esgotar todas as suas fontes de energia e todas as estrelas se apagarem.

Sugestão de leitura

FORTEY, R. *Vida*: uma biografia não autorizada. Rio de Janeiro: Record, 2000.

Agradecimentos

Os autores agradecem Fernando Paolo, da UCSD, e o professor Rodrigo Santucci, da UNB, pelas informações e complementos.

Referências

PROSS, A. *What is Life?* How chemistry becomes biology. Oxford University Press, 2012.

KNOLL, A. H. *Life on a young planet*: the first three billion years of evolution on Earth. Princeton University Press, 2015.

EXPLORAÇÃO INTERESTELAR

Motivações, sistemas estelares, tecnologias e financiamento

CAPÍTULO 16

Amanda Gonçalves Bendia

"I am tormented with an everlasting itch for things remote. I love to sail forbidden seas."
Herman Melville, *Moby Dick*

Introdução

A viagem para outras estrelas fascina a humanidade desde o início das primeiras civilizações e a sua idealização está progredindo cada vez mais conforme o desenvolvimento científico e tecnológico. A ficção científica, representada na literatura e no cinema, desempenha um papel importante ao conjecturar como seriam os primeiros avanços da exploração interestelar. Inúmeros vislumbres da ficção científica já inspiraram avanços científicos reais. Em *2001: uma odisseia no espaço*, publicado em 1968, Arthur C. Clarke descreveu em detalhes uma estação espacial orbitando a Terra. A primeira estação espacial de baixa órbita

(*Salyut 1*) só seria lançada seis anos depois (1971) pela União Soviética. As décadas de 1960 e 1970 contaram com um grande entusiasmo pelos programas espaciais, especialmente por causa das influências da Guerra Fria.

Após o otimismo desse período, o financiamento para os programas espaciais tornou-se incerto e a exploração tripulada do espaço atualmente é limitada à Estação Espacial Internacional (ISS, um esforço internacional gerenciado primariamente pela Nasa – EUA). Muitos opinam que qualquer custo dedicado à exploração espacial deveria ser revertido para outras áreas de pesquisa científica, que tenham uma aplicação direta nos problemas de nosso planeta. Por outro lado, muitos acreditam que a exploração interestelar será essencial para a sobrevivência a longo prazo da espécie humana.

Os problemas que envolvem a exploração interestelar são essencialmente as longas distâncias, a tecnologia necessária e o financiamento. Além disso, durante a viagem interestelar, alguns problemas podem se manifestar para a tripulação, como problemas fisiológicos pela ausência de gravidade, problemas psicológicos ou médicos em geral, alta incidência de radiação e reciclagem de recursos. Há também a questão: estamos preparados para nos desgarrarmos completamente de nosso planeta, e talvez nunca mais voltarmos? Passarmos a vida inteira confinados em habitats tecnológicos? Para a solução desses problemas é essencial o avanço científico multidisciplinar em genética, imunologia, indústria farmacêutica, robótica e sistemas inteligentes. Para a colonização de planetas em outros sistemas estelares será essencial a escolha de pessoas que desempenhem funções úteis, como engenheiros, geólogos, bioquímicos, agrônomos, médicos, administradores, logísticos etc. Mas será fundamental incluir pessoas com profunda habilidade social e, talvez, até mesmo artística, de maneira a garantir uma convivência pacífica e conciliadora.

Não é trivial garantir uma convivência pacífica em um espaço confinado por tanto tempo. Estudos em ecologia da conservação indicam que um número mínimo de 50 colonizadores

seria fundamental para evitar as taxas de endogamia e manter a variabilidade genética, mas isso em uma discussão unicamente biológica. As grandes distâncias interestelares tornam as viagens tripuladas consideravelmente longas, cerca de milhares de anos. Algumas opções são cogitadas para a solução desse problema, como naves que mantenham gerações de humanos ao longo dos milhares de anos, ou ainda, a animação suspensa (hibernação), congelamento de embriões e *upload* da mente, por mais ficcional que possa parecer (atualmente). Contudo, novas tecnologias de sistemas de propulsão e aceleração constante podem tornar as viagens interestelares substancialmente mais rápidas, em torno de dezenas de anos.

Estimativas baseadas nos avanços científicos e tecnológicos atuais indicam que a exploração de sistemas estelares mais próximos será possível dentro de 50 a 100 anos. O desenvolvimento de novos telescópios, que permitam estudar especialmente a composição de exoplanetas próximos, irá nortear os principais alvos para as primeiras viagens espaciais. É provável que sejam enviadas inicialmente espaçonaves não tripuladas para os sistemas estelares próximos. Após o aperfeiçoamento dos sistemas de propulsão para a aquisição de velocidades consideravelmente altas, talvez as viagens tripuladas se tornem possíveis. A seguir, serão discutidas algumas das principais motivações para a exploração interestelar, os sistemas estelares próximos mais interessantes para a exploração e colonização humana, as tecnologias de sistemas de propulsão mais eficientes e viáveis e, por fim, o financiamento necessário para a realização de viagens tripuladas e não tripuladas rumo às estrelas mais próximas.

Motivações para a exploração interestelar

Alguns dos motivos que podem impulsionar a exploração de outros sistemas estelares são a sobrevivência da espécie, o acesso a recursos naturais de interesse econômico, a propagação da vida no Universo e a própria curiosidade exploratória da natureza humana.

Muitos argumentam que a sobrevivência da espécie humana não é o fator principal que justificaria a exploração interestelar, por causa das escalas temporais envolvidas. Contudo, alguns dos efeitos causados pelo crescimento populacional podem motivar nossa saída do planeta, como o esgotamento dos recursos naturais e os desastres antropogênicos. Para refletir sobre esse cenário, basta examinar a história da nossa espécie. Um exemplo interessante é a colonização da Polinésia no oceano Pacífico entre 3000 a.C. e 800 d.C. A população austronésia, provavelmente da ilha de Taiwan ou da região sul das Filipinas, migrou e espalhou-se em direção à Polinésia, Micronésia e Melanésia. Os povos austronésios fizeram longas viagens planejadas de canoas, carregando consigo diversos produtos e animais. É provável que os motivos de suas migrações tenham sido devido ao crescimento populacional e esgotamento de recursos naturais (Bignami; Sommariva, 2013).

Atualmente, há cerca de 7 bilhões de habitantes humanos no planeta, e estima-se um total de 9 bilhões para 2050. Podemos transpor o exemplo da migração da população Austronésia para uma escala planetária de crescimento populacional e esgotamento de recursos e, desse modo, a necessidade de colonizar outros planetas pode acabar se tornando de extrema importância. Existem duas correntes de pensamento a respeito do esgotamento dos recursos naturais pelo crescimento populacional: o neomalthusianismo afirma que a população irá realmente ultrapassar os recursos naturais disponíveis, de modo que a civilização como a conhecemos irá entrar em colapso dentro de algumas dezenas de anos. Por outro lado, a revolução agronômica, que ocasionou um aumento de aproximadamente 250% na produção de alimentos fez que muitos confiassem que os avanços científicos e tecnológicos na agricultura irão solucionar o problema de esgotamento de recursos (Sommariva, 2014).

Além do esgotamento de recursos, outros problemas, como desastres antropogênicos e naturais, tornam-se evidentes

quando consideramos a nossa permanência no planeta a longo (ou mesmo a médio) prazo. O uso exacerbado de combustíveis fósseis é uma das principais preocupações por causa da emissão de gases do efeito estufa, que poderão provocar sérias mudanças climáticas no futuro próximo. A colisão de meteoritos, asteroides ou cometas é também uma grande preocupação para a sobrevivência da nossa espécie na Terra. Essas colisões ocorreram periodicamente na história da Terra, e algumas delas talvez tenham contribuído para a extinção de mais de 90% da vida no planeta. No Cretáceo-Paleógeno (K-Pg), um asteroide de 10 km causou um impacto de 1 milhão de megatons, extinguindo todos os dinossauros não avianos. Um impacto dessa magnitude tem uma frequência de recorrência de aproximadamente 35 milhões de anos (Tabela 16.1). Se um asteroide de 1 km causasse um impacto de 10 mil megatons, é muito provável que todas as civilizações da Terra entrassem em colapso. Estimativas sugerem que um asteroide dessa proporção pode colidir com a Terra em 2880 d.C. Outro problema natural, além do longuíssimo prazo, é a evolução natural do Sol, que, com o tempo, irá se tornar uma gigante vermelha. Estimativas sugerem que em 1 bilhão de anos ocorrerá um aquecimento de 10% da Terra, que será totalmente consumida pelo Sol nos próximos 5 bilhões de anos (Bignami; Sommariva, 2013). O filósofo e matemático Bertrand Russel apresentava uma visão pessimista a respeito do nosso futuro na Terra:

> Nenhum fogo, heroísmo ou intensidade de pensamento ou sentimento pode preservar a vida além do túmulo. Todo o trabalho ao longo das eras, toda a devoção, inspiração e o brilho do gênio humano estão destinados a se extinguir na imensa morte do Sistema Solar. E o templo das conquistas do homem será inevitavelmente enterrado sob os escombros de um Universo em ruínas.

Por outro lado, uma visão mais otimista do físico Stephen Hawking diz:

> Não acho que vamos sobreviver outros mil anos sem fugir do nosso frágil planeta. Mais cedo ou mais tarde, desastres como a colisão de um asteroide ou uma guerra nuclear podem nos dizimar. Mas uma vez que comecemos a nos espalhar pelo espaço e a estabelecer colônias independentes, nosso futuro deve estar garantido.

Tabela 16.1. Frequência em anos de colisões em termos de megatons

Impacto em termos de megatons	Frequência em anos
10	1.088
50	4.600
100	8.600
500	36.800
1.000	68.700
10.000	545.000
1.000.000	35.000.000

Fonte: Adaptado de Bignami e Sommariva (2013)

Além das questões de sobrevivência da nossa espécie, outros motivos podem impulsionar a colonização de planetas em outros sistemas estelares, como interesses econômicos e comerciais na exploração de recursos. Mas, acima de tudo, talvez um dos principais alicerces da exploração interestelar ainda seja a própria natureza humana: curiosa, exploratória, habilidosa e adaptável. Características tais que fizeram que a humanidade dominasse a tecnologia, a ciência e o planeta. De forma análoga, a exploração dos primeiros navegadores europeus em direção às Américas no século XV foi sustentada pela curiosidade inquietante de percorrer águas desconhecidas. Ou os primeiros exploradores do Polo Sul, que, apesar de todas as condições hostis, se nutriam da curiosidade em atingir locais que nenhum ser humano jamais alcançou.

Contudo, para que a exploração interestelar se torne plausível, é essencial que encontremos planetas habitáveis capazes de suportar vida, sobretudo vida humana.

Sistemas estelares e planetas habitáveis

Milhares de planetas considerados habitáveis já foram detectados nos últimos anos e muitos outros virão. Contudo, na busca de alvos para a exploração interestelar é preciso considerar algumas características importantes. O planeta precisa estar em um sistema estelar a, no máximo, 25 anos-luz de distância (devido a nossas atuais limitações tecnológicas). Precisa ser rochoso e de tamanho semelhante a Terra (ou então pode ser um gigante gasoso que possua luas habitáveis). Deve ter água líquida e, portanto, estar na zona de habitabilidade de sua estrela. É importante que tenha um campo magnético que o proteja da radiação cósmica, e que preferencialmente tenha oxigênio em sua atmosfera. É conveniente que tenha uma lua que seja capaz de estabilizar sua obliquidade. Além disso, é necessário que a sua estrela seja semelhante ao Sol em relação ao seu espectro, massa, raio e luminosidade. Ou, ainda, muitos astrônomos têm indicado estrelas do tipo anãs de classe M como alvos interessantes, por serem mais numerosas e estáveis.

Na Tabela 16.2 estão representados alguns dos principais sistemas estelares alvos para a exploração interestelar.

Alfa Centauri é o sistema mais próximo, a 4,3 anos-luz da Terra. Possui entre 4,5 e 7 bilhões de anos de idade e é um sistema estelar múltiplo que provavelmente possui elementos químicos pesados, como o nosso Sistema Solar. Até o momento, foram detectados dois exoplanetas, Alfa Centauri B_b e Alfa Centauri B_c, em 2012 e 2015, respectivamente. Contudo, ambos os exoplanetas não se encontram na zona habitável da estrela (Dumusque et al., 2012).

A estrela de Barnard está a 6 anos-luz da Terra; é uma anã vermelha de baixa massa, que possui cerca de 7 a 12 bilhões de anos, sendo uma das mais antigas da Via Láctea. Em 1973 foi detectado um planeta com massa semelhante a Júpiter, contudo, análises posteriores feitas pelo telescópio espacial *Hubble* não o detectaram. Muitos astrônomos indicam que é provável que esse sistema tenha planetas rochosos do tamanho da Terra, mas que ainda não foram confirmados (Lissauer, 2002).

Tabela 16.2. Lista de alvos interessantes para a exploração interestelar

Sistema Estelar	Distância em anos-luz da Terra	Detalhes
Alfa Centauri	4,3	Sistema mais próximo. Triplo (G0, K5, M5). Componente quase idêntico ao Sol. Alta probabilidade de planetas que poderiam "abrigar a vida"
Estrela de Barnard	6	Sistema mais próximo conhecido a ter um ou talvez dois planetas. Anã vermelha (M5) pequena de baixa luminosidade
Lalande 21185	8,2	Anã vermelha (M2) com um planeta conhecido
Espesilon Eridani	10,8	Sistema com apenas uma estrela; um pouco menor e mais fria que o Sol (K2); pode ter um sistema planetário parecido com o Sistema Solar
Procyon	11,3	Estrela de grande massa (luz branca); perde apenas para a Altair em luminosidade (20 anos-luz). O sistema contém uma anã branca
Tau Ceti	11,8	Sistema apenas com uma estrela, com luminosidade e tamanho similares aos do Sol (G4). Alta probabilidade de possuir um sistema planetário parecido com o Sistema Solar
Gliese 876	15	Anã vermelha com um sistema planetário composto de quatro planetas

Lalande 21185 é uma anã vermelha a 8,31 anos-luz. Múltiplos planetas foram detectados por astrometria em 1996; entretanto, pesquisas subsequentes não os detectaram. Os limites de detecção dos métodos atuais nesse sistema são de planetas de massa um pouco menor que Júpiter, e é provável que, por esse motivo, os planetas rochosos desse sistema ainda não foram observados (Schneider et al., 2011).

Epsilon Eridani está a 10,5 anos-luz da Terra, possui menos que 1 bilhão de anos, tem alta atividade magnética (30 vezes maior que a do Sol) e é menor e menos massiva que o Sol. Poucos elementos mais pesados que o hélio foram detectados nessa estrela.

A detecção de planetas nesse sistema é notadamente difícil, visto que a estrela emite sinais que mimetizam a presença de planetas. Um único planeta (Epsilon Eridane b) foi detectado nesse sistema em 2000, em uma posição semelhante à de Júpiter no Sistema Solar; porém, pouco se sabe a respeito de seu tamanho e composição (Metcalfe et al., 2013).

Gliese 876 é uma anã vermelha a 15 anos-luz da Terra. Múltiplos planetas foram detectados nesse sistema: Gliese 876 d, Gliese 876 c, Gliese 876 b e Gliese 876 e. Os três últimos são planetas gasosos do tamanho de Júpiter (Gliese 876 c, b, e), e Gliese 876 d é uma Superterra. Até o momento, poucas informações foram obtidas sobre esses exoplanetas (Shankland et al., 2006).

Tau Ceti, Gliese 581 e Gliese 667C são atualmente os sistemas candidatos mais interessantes para as viagens interestelares. Tauti Ceti é muito similar ao Sol espectroscopicamente. Está a 12 anos-luz de distância da Terra, possui 78% da massa do Sol e é significativamente estável. Foram detectados cinco planetas nesse sistema: Tau Ceti b, Tau Ceti c, Tau Ceti d, Tau Ceti e, e Tau Ceti f, provavelmente todos rochosos. Os planetas exibem períodos orbitais de 14 a 640 dias e possuem de 2 a 6 vezes a massa da Terra. O menor, Tau Ceti e, está localizado na zona habitável da estrela, a 0,552 UA (zona habitável de 0,55 a 1,16 UA), e é o candidato mais interessante desse sistema como alvo para a exploração e possível colonização humana (Tuomi et al., 2013). Gliese 581 é uma anã vermelha, com 3 vezes a massa do Sol e está a 20 anos-luz da Terra. Foram confirmados quatro planetas Gliese 581 b, Gliese 581 c, Gliese 581 e, Gliese 581 d, e mais dois foram propostos (Gliese 581 f e Gliese 581 g). Gliese 581 c está na zona habitável, contudo parece ter um efeito estufa que o torna muito quente. Gliese 581 g e Gliese 581 d também estão na zona habitável, e Gliese 581 g é um dos principais candidatos à habitabilidade entre planetas de todos os sistemas estelares estudados até o momento (Figuras 16.1 e 16.2).

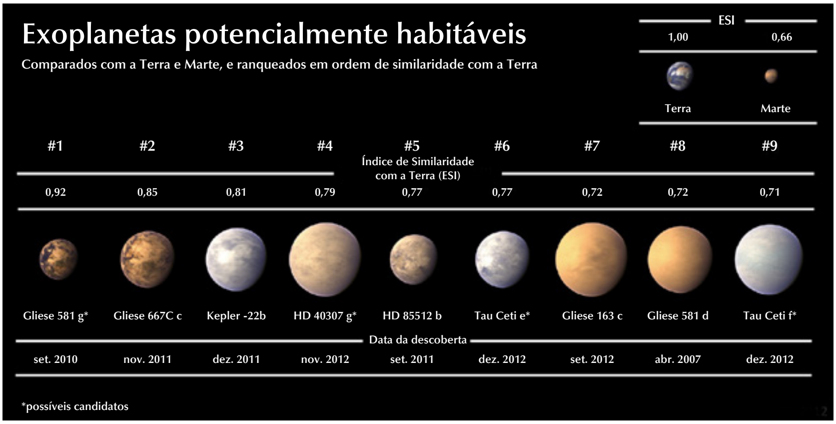


Figura 16.1. Ranking de exoplanetas habitáveis detectados até 2012. Fonte: PHL, UPR Arecibo (phl.upr.edu), 2012

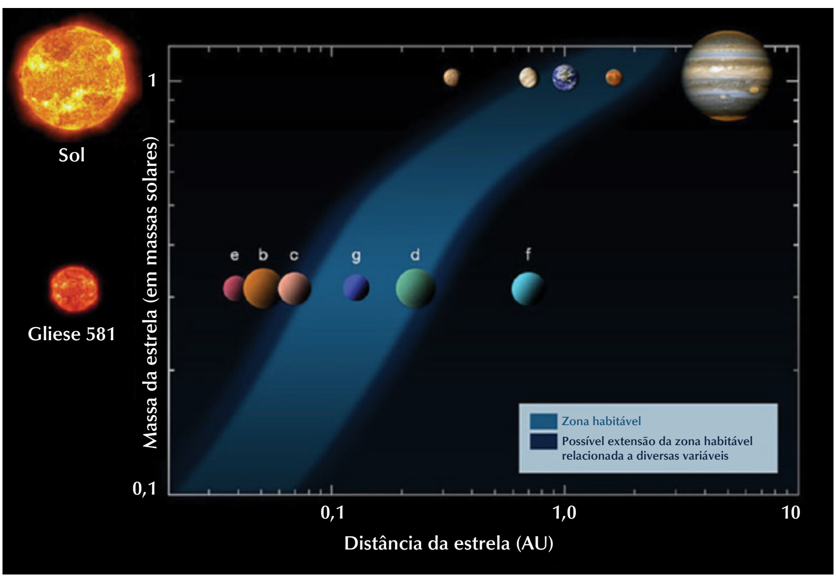


Figura 16.2. Zona de Habitabilidade do sistema planetário de Gliese 581. Fonte: Adaptado de European Southern Observatory – ESO (eso.org)

Em 2008 foi enviado um sinal de rádio visando à comunicação com possíveis seres inteligentes desse sistema, que chegará em 2029 (Gregory, 2012). Gliese 667C está a 22 anos-luz da Terra e é um sistema de três estrelas (A, B e C). Foram detectados dois planetas ao redor da estrela C de Gliese 667 (Gliese 667C

b e Gliese 667C c), e mais cinco planetas que ainda não foram confirmados. Gliese 667C c recebe 90% da luminosidade que a Terra recebe e, por absorver energia eletromagnética, estimativas indicam que são alcançadas temperaturas próximas a confortáveis 4 °C. Gliese 667C c está classificado como o segundo planeta mais semelhante à Terra descoberto até o momento (Figura 16.1) (Robertson; Mahadevan, 2014).

Avanços na busca de exoplanetas e de estudos quanto à sua composição serão essenciais para que a exploração interestelar torne-se factível. Novos telescópios estão sendo desenvolvidos para essa finalidade, como o Next-Generation Transit Survey (NGTS) e o Very Large Telescope, e é provável que nos próximos anos muitas informações sobre a composição desses exoplanetas sejam reveladas.

Tecnologia de propulsão

Uma vez que as distâncias interestelares são substancialmente elevadas, uma velocidade significativa é necessária para que a espaçonave alcance seu destino em um tempo razoável. Adquirir tal velocidade no lançamento e desacelerar no momento da chegada ao planeta-alvo é um desafio para os engenheiros das espaçonaves. O problema de escapar da gravidade da Terra pode ser solucionado quando se considera a construção de um porto espacial na órbita da Terra ou nos pontos de Lagrange, entre a Terra e a Lua. Dessa forma é necessário o desenvolvimento de sistemas de propulsão capazes de acelerar a espaçonave a frações significativas da velocidade da luz. Se uma espaçonave fosse capaz de viajar a uma velocidade média equivalente a 10% da velocidade da luz, seria possível alcançar Alfa Centauri em quarenta anos (Bignami; Sommariva, 2013). Diversos sistemas de propulsão seriam capazes disso, mas ainda nenhum deles é economicamente viável. Na Tabela 16.3 estão representados os impulsos específicos em segundos para alguns sistemas de propulsão. A seguir serão descritos os principais sistemas de propulsão de acordo com as tecnologias atuais: reatores nucleares (fissão e fusão nuclear), veleiros solares movidos por lasers e sistemas de antimatéria.

Tabela 16.3. Impulsos específicos em segundos de acordo com cada tipo de engenharia espacial

Tipo de propulsão de espaçonaves	Impulso específico
Combustível sólido	250
Combustível líquido	450
Íons	3.000
Fissão nuclear	800 – 1.000
VASIMR (plasma)	1.000 – 30.000
Fusão nuclear	2.500 – 200.000
Pulso nuclear	10.000 – 1 milhão
Aniquilação matéria-antimatéria	1 milhão – 10 milhões

Fonte: Adaptado de Bignami e Sommariva (2013)

Dois tipos de reatores nucleares podem ser considerados para os sistemas de propulsão de espaçonaves: sistemas de fissão nuclear e sistemas de fusão nuclear. A fissão nuclear opera como uma série de explosões de bombas nucleares, absorvendo parte do momento dos detritos resultantes. Pode atingir aceleração de 1 g por 10 dias até seu combustível esgotar, atingindo velocidades de aproximadamente 10.000 km/s, ou 3,3% da velocidade da luz. Esse tipo de propulsão seria mais adequado para a exploração do Sistema Solar do que para as explorações interestelares. Contudo, alguns melhoramentos, como a transferência direta de energia para o gás propulsivo, podem futuramente tornar viáveis as missões interestelares com esse tipo de propulsor (Bignami; Sommariva, 2013). Na década de 1960, o projeto Orion idealizou uma espaçonave movida por sistemas de fissão nuclear; contudo, o projeto nunca foi executado devido à dificuldade de se iniciar reações nucleares controladas (Dyson, 1968).

A fusão nuclear consiste na fusão de plasma (especialmente de hidrogênio) em altas temperaturas, confinado em garrafas magnéticas. Outros elementos poderiam servir também como combustível, como o deutério, o trítio e o hélio. A fusão nuclear é energeticamente mais favorável que a fissão e possui maior

impulso específico, apresentando maior eficiência de aceleração a longo prazo. Com esse tipo de propulsão, seria possível atingir 10% da velocidade da luz, tornando viáveis viagens para estrelas mais próximas. A principal desvantagem da fusão nuclear como sistema propulsor é a grande massa necessária para o reator de fusão (Bignami; Sommariva, 2013). Além disso, esse sistema envolve tecnologias massivas que podem ainda demorar décadas para se desenvolverem. O Projeto Daedalus, realizado pela British Interplanerary Society na década de 1970, idealizou uma espaçonave interestelar tripulada com sistema de propulsão por fusão nuclear, que deveria chegar à estrela de Barnard dentro de 50 anos (Crawford, 1990). No entanto, da mesma forma que na fissão nuclear, a tecnologia necessária para sustentar a fusão controlada de maneira a impulsionar uma nave ainda está em desenvolvimento.

Veleiros solares movidos por lasers poderiam alcançar velocidades ainda maiores. Nesse sistema de propulsão, a pressão de radiação dos fótons emitidos por lasers empurraria uma vela gigante de quilômetros de extensão, acelerando a espaçonave a velocidades que poderiam chegar a 50% da velocidade da luz. As velas são feitas de grandes espelhos membranosos de pouca massa que ganham momento linear ao refletirem fótons. Os lasers devem se posicionar em órbitas próximas do Sistema Solar e podem obter energia da radiação solar para seu funcionamento. Em 2004, um foguete japonês lançou com sucesso dois pequenos protótipos de veleiros solares no espaço. Em 2006, um veleiro solar de 15 m foi lançado em órbita pelo foguete japonês M-V, embora a vela não tenha sido aberta completamente. O principal problema desse sistema de propulsão seria a montagem e o material das imensas velas solares, visto que o sistema de propulsão por lasers propriamente dito já é uma tecnologia acessível atualmente (Bignami; Sommariva, 2013; Johnson et al., 2011) (Figura 16.3).

O sistema de propulsão por antimatéria consiste na aniquilação de partículas subatômicas com suas correspondentes de antimatéria. Esse tipo de reação apresenta a maior taxa de energia

por unidade de massa em relação a qualquer outra reação conhecida pela física. A antimatéria deve ser estocada em compartimentos com campos elétricos e magnéticos (Figura 16.4). Dois tipos de propulsão de antimatéria podem ser explorados: sistemas de propulsão gerados somente pela energia aniquilada, e sistemas que usam antiprótons para iniciar processos de fusão em um plasma comprimido ou condensado (Keane; Zhang, 2011). A propulsão por antimatéria pode atingir até 60% da velocidade da luz. O principal problema é a estocagem e produção de grandes quantidades de antimatéria. Contudo, se o problema um dia for solucionado, esse será, sem dúvida, o sistema mais viável para a realização das viagens interestelares (Bignami; Sommariva, 2013).

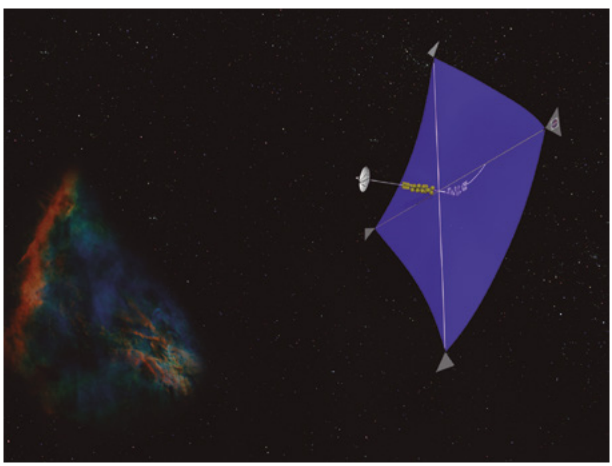


Figura 16.3. Concepção artística de um veleiro solar. Fonte: Nasa/MSFC

Na Tabela 16.4 estão listadas diferentes formas de transporte e o tempo aproximado para a chegada até Alfa Centauri, a 4,28 anos-luz da Terra. Observa-se que, com os sistemas de propulsão de velas solares ou antimatéria, o tempo de chegada é de menos de 10 anos. No entanto, pouco se sabe quais seriam os efeitos fisiológicos em humanos ao se atingir frações significativas da velocidade da luz e, especialmente, como lidar com as acelerações e desacelerações necessárias.

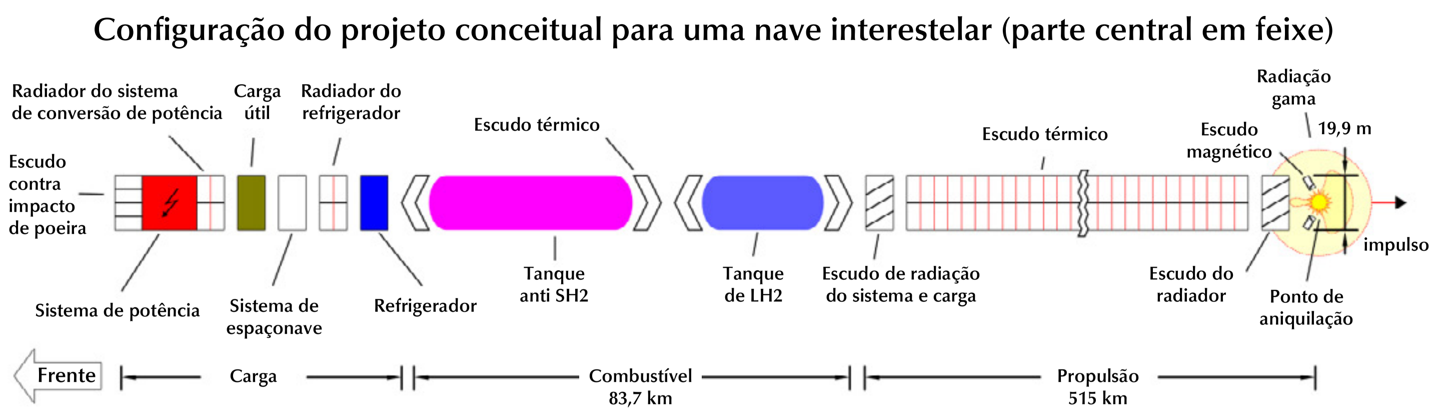


Figura 16.4. Esquema de um sistema de propulsão por antimatéria. Fonte: Adaptado de Frisbee (2003)

Tabela 16.4. Tempo aproximado em anos até a chegada ao sistema de Alfa Centauri, de acordo com diferentes formas de transporte e sistemas de propulsão

Forma de transporte	Velocidade	Tempo
A pé	0,0013	1.000.000.000
Carro	0,026	50.000.000
Boeing 747	0,26	5.000.000
Voyager 1	17	76.000
Fissão Nuclear	10.000	120
Fusão Nuclear	30.000	40
Velas Solares	150.000	9
Antimatéria	160.000	8
Luz	300.000	4,28

Fonte: Adaptado de Bignami e Sommariva (2013)

Financiamento

Diversas críticas da população em geral são atribuídas aos investimentos governamentais com os programas espaciais. O argumento fundamenta-se no fato de que os problemas terrestres já são grandes demais para termos também que nos preocupar com gastos em ciência do espaço. Os problemas terrestres argumentados, sobretudo a pobreza e escassez de alimentos, poderiam ser significativamente solucionados caso houvesse melhor distribuição de renda e interesse dos governantes. Além disso, o investimento na indústria militar é espantosamente maior em comparação a investimentos em qualquer outro setor, inclusive nos programas espaciais (Tabela 16.5). Para que nossa civilização tenha grandes avanços científicos e tecnológicos, é necessário que estejamos prontos para uma cultura de cooperação e não violência, reduzindo gradualmente os gastos militares e dedicando os recursos a outros setores, inclusive para a exploração espacial. A redução dos gastos militares poderia não causar grandes efeitos negativos nas atividades econômicas, uma vez que grande parte das indústrias envolvidas na produção de tecnologia militar, como as indústrias aeroespaciais, certamente

participariam dos novos programas espaciais. Dessa forma, provavelmente somente com essa postura de cooperação e não violência serão viáveis os avanços para a exploração interestelar.

Tabela 16.5. Comparação entre o investimento de programas militares e espaciais

	2011	30 anos (extrapolação	%
Gastos militares mundiais	1.617,7	48.531	100
Gastos militares dos EUA	739,3	22.179	45,7
Gastos militares no restante do mundo	878,4	26.352	54,3
Gastos totais com pesquisas espaciais	24,9	748.0	100
Nasa[1]	16,0	480.0	64,2
ESA	5,6	168.0	22,5
Estação Espacial Internacional	3,3	100.0	13,4
Gastos espaciais em relação (%) aos gastos militares			
Nasa[1]	1,0	1.3	
ESA	0,3	0.3	
Estação espacial internacional (EII)	0,2	0.2	

Fonte: Bignami e Sommariva (2013)

[1]Excluindo-se gastos com a Estação Espacial Internacional. Fonte dos dados dos gastos militares: IISS; orçamentos espaciais: Nasa e ESA

Bignami e Sommariva (2013) propõem três possíveis estágios para um programa espacial interestelar e os custos para cada um, tornando-os factíveis quando se considera os interesses econômicos em seu investimento. O primeiro consistiria no design da tecnologia de propulsão adequada para viagens tripuladas inicialmente no Sistema Solar e sondas automatizadas para missões interestelares. O segundo contaria com a construção de uma infraestrutura (espaço-porto) que transportasse para o espaço as naves espaciais projetadas, e com o design de uma espaçonave capaz de atingir uma fração significativa da velocidade da luz. No terceiro, por fim, ocorreria a exploração tripulada e colonização dos sistemas estelares próximos.

A seguir serão apresentados os custos estimados para cada etapa descrita acima, de acordo com Bignami e Sommariva (2013).

O primeiro estágio não deve exceder alguns poucos bilhões em um período de 10 anos. Atualmente, para a tecnologia de antimatéria, 1g de antipróton custaria cerca de 63 trilhões de dólares. Contudo, é importante considerar que, conforme os avanços tecnológicos, este preço tende a decair ao longo do tempo. Além disso, upgrades na tecnologia de antimatéria podem diminuir a quantidade de antiprótons necessária para o sistema de propulsão. É estimado que seja necessário de 1 a 100μg de antiprótons para sondas não tripuladas em missões interestelares ou para espaçonaves tripuladas no Sistema Solar. O custo para a produção dessa quantidade de antiprótons seria em torno de 60 milhões de dólares. Para a produção de antimatéria, seria interessante a construção de instalações que podem servir também para outras aplicações além da espacial. O custo para a construção delas seria em torno de 20 a 30 bilhões de dólares.

O segundo estágio seria o mais caro de todos – a etapa para a construção de um porto espacial orbitando a Terra, com a finalidade de montagem e lançamento das sondas interestelares e naves espaciais tripuladas para o Sistema Solar. Além disso, o porto espacial auxiliaria o desenvolvimento de sistemas de propulsão para viagens interestelares tripuladas no futuro, previstas para o terceiro estágio do programa espacial interestelar. O custo para a montagem do porto espacial, baseado nos custos de montagem da Estação Espacial Internacional (ISS), seria entre 200 e 300 bilhões de dólares em 30 anos. Cerca de 10 bilhões de dólares seriam gastos por cada sonda não tripulada enviada, considerando a tecnologia de antimatéria. Para uma missão tripulada no Sistema Solar – para Marte, por exemplo –, os custos estariam entre 20 e 50 bilhões de dólares. O total de investimento para esse segundo estágio seria entre 300 e 500 bilhões de dólares em 30 anos. Esses valores, apesar de parecerem muito altos, poderiam estar disponíveis se houvesse uma redução de 1,5% dos gastos militares durante o mesmo período de tempo (30 anos).

No terceiro estágio, os custos para uma nave tripulada baseada em antimatéria para a exploração de estrelas próximas seria entre 30

e 40 bilhões de dólares, considerando a construção do porto espacial no segundo estágio. Esse valor razoável ainda poderia diminuir de acordo com os avanços tecnológicos de produção de antimatéria.

Conclusões

A viagem interestelar apresenta uma série de dificuldades: a descoberta e o estudo de exoplanetas habitáveis para a nossa possível colonização, o desenvolvimento de tecnologias de propulsão capazes de atingir frações significativas da velocidade da luz e o interesse do governo em financiar os programas espaciais interestelares. Essas viagens parecem inviáveis ao se imaginar que mal conseguimos explorar o nosso próprio Sistema Solar. Contudo, o desenvolvimento científico e tecnológico avança em fase exponencial, e com um pouco de interesse do governo em investir nos programas espaciais é provável que consigamos explorar estrelas próximas nos próximos 50 ou 100 anos. Se quisermos considerar a sobrevivência da humanidade a longo prazo, é necessário que o pensamento de cooperação supere os conflitos locais, e que as forças e investimentos se reúnam para garantir nosso futuro nas estrelas.

Referências

Bignami, G. F.; Sommariva, A. *A scenario for interstellar exploration and its financing*. Nova York: Springer, 2013.

Crawford, I. A. Interstellar travel: a review for astronomers. *Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society*, v. 31, p. 377-400, 1990.

Dyson, F. J. Interstellar transport. *Physics Today*, v. 21, n. 10, p. 41-45, 1968.

Dumusque, X. et al. An Earth-mass planet orbiting [agr] Centauri B. *Nature*, v. 491, n. 7423, p. 207-211, 2012.

Frisbee, R. H. How to build an antimatter rocket for interstellar missions-systems level considerations in designing advanced propulsion technology vehicles. *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, 2003.

GREGORY, P. C. Bayesian re-analysis of the Gliese 581 exoplanet system. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 415, n. 3, p. 2523-2545, 2011.

JOHNSON, L. et al. NanoSail-D: A solar sail demonstration mission. *Acta Astronautica*, v. 68, n. 5, p. 571-575, 2011.

KEANE, R.; ZHANG, W. M. Reconsideration of propulsion by antimatter. *Journal of Propulsion and Power*, v. 27, n. 5, p. 1153-1157, 2011.

LISSAUER, J. J. Extrasolar planets. *Nature*, v. 419, n. 6905, p. 355-358, 2002.

METCALFE, T. S. et al. Magnetic activity cycles in the exoplanet host star eridani. *The Astrophysical Journal Letters*, v. 763, n. 2, p. L26, 2013.

ROBERTSON, P.; MAHADEVAN, S. Disentangling planets and stellar activity for Gliese 667C. *The Astrophysical Journal Letters*, v. 793, n. 2, p. L24, 2014.

SCHNEIDER, J. et al. Defining and cataloging exoplanets: the exoplanet.eu database. *Astronomy & Astrophysics*, v. 532, p. A79, 2011.

SHANKLAND, P. D. et al. On the search for transits of the planets orbiting Gliese 876. *The Astrophysical Journal*, v. 653, n. 1, p. 700, 2006.

SOMMARIVA, A. Motivations behind interstellar exploration and colonization. *Astropolitics*, v. 12, n. 1, p. 82-94, 2014.

TUOMI, M. et al. Signals embedded in the radial velocity noise-periodic variations in the τ Ceti velocities. *Astronomy & Astrophysics*, v. 551, p. A79, 2013.

GLOSSÁRIO

Abiogênese	Hipótese científica que se refere à origem da vida a partir da matéria inanimada, pelo aumento da complexidade química do meio, auto-organização e surgimento de uma entidade autopoiética.
Absorção química	Processo em que um material é retido no interior de outro material.
Ácido nucleico	Um polímero de nucleotídeos. Nos organismos vivos, formam as moléculas que contêm a informação genética (DNA e RNA).
Acidofílico (Acidófilo)	Organismo que cresce melhor em valores de pH abaixo de 5,0.
ADP	Adenosina difosfato.

Adsorção Processo em que um material é retido na superfície de um sólido.

Aeróbio Quando o processo de produção de energia metabólica de um organismo depende de moléculas de oxigênio.

Alcalifílico (Alcalífico) Organismo que cresce melhor em valores de pH acima de 8,0.

Alelo Variante de um determinado gene.

Ambientes extremos Ambientes da Terra cujos parâmetros físico-químicos (temperatura, pH, salinidade, radiação, ausência de água líquida, entre outros) são extremamente baixos ou elevados, dificultando a sobrevivência dos organismos vivos.

Ameba tecada Organismo de morfologia ameboide (ou seja, se movimenta utilizando pseudópodes) que constrói uma carapaça, também chamada de teca, onde vive.

Aminoácido Molécula que possui um grupo carboxílico (COOH) e um grupo amina (NH_2). O aminoácido mais simples, a glicina, já foi detectado no meio interestelar e em meteoritos, tendo sido sintetizado em processo astroquímicos. Eles são os monômeros que formam os peptídeos e proteínas.

Anã marrom Corpo celeste constituído majoritariamente de hidrogênio e hélio, similar a uma estrela, mas que não possui massa suficiente para iniciar a fusão do hidrogênio. Dependendo da massa, no entanto, pode fundir deutério e lítio.

Anaeróbio Quando não há participação de oxigênio no processo de produção de energia metabólica de um organismo. Como alternativa à respiração aeróbica, pode ser utilizada a respiração anaeróbica ou fermentação, porém com uma eficiência energética inferior ao processo aeróbico.

Ânion Íon com carga negativa.

Arqueano Intervalo de tempo geológico entre 2,5 e 4 bilhões de anos atrás. Época das primeiras evidências de fósseis no planeta Terra, sendo seguido pelo Proterozoico.

Arqueia (ou Archaea) Um dos 3 domínios da vida, na classificação atual. Micro-organismos similares a bactérias em termos de morfologia celular, porém classificados em um Domínio distinto por possuir diferenças em seu genoma, metabolismo e histórico evolutivo.

Árvore filogenética Representação gráfica da história evolutiva (natural) dos organismos vivos. Pode ser construída usando como base variações entre genes ou traços fenotípicos químicos e morfológicos, que são indicativos de proximidade ou distância evolutiva.

Asteroide Pequeno corpo rochoso que orbita o Sol, tendo um raio típico inferior a centenas de quilômetros. Podem ser resquícios do processo de formação do Sistema Solar ou resultado de choques com planetas. Normalmente não apresentam geometria esférica por não

possuírem massa suficiente para a diferenciação de sua estrutura por força gravitacional.

Atmosfera redutora Atmosfera sem, ou com poucos, compostos oxidantes (O_2, CO_2, NO_x etc.), podendo ser rica, por exemplo, em H_2.

Átomo Unidade básica da matéria que ainda conserva suas principais características. Constituído de um núcleo positivo com prótons e nêutrons, envolto por uma nuvem de elétrons de carga negativa.

ATP Adenosina trifosfato. Molécula utilizada para armazenamento temporário de energia química na forma da ligação fosfato-fostato. Essa ligação pode ser formada ou quebrada conforme a necessidade metabólica celular.

Autocatalítico Material ou molécula capaz de acelerar reações para sua própria síntese.

Autopoiese Propriedade de um sistema de se auto-organizar (emergência) e de se automanter com o tempo (com gasto de energia).

Bactérias Um dos três domínios da vida, na classificação atual. Micro-organismos procariotos, mas distintos na genética e bioquímica das arqueias.

Barofílico Organismo adaptado ao crescimento sob pressão acima de 300 atm. Tipicamente encontrados no fundo dos oceanos ou na litosfera.

Big Bang — Evento que teria ocorrido cerca de 13,82 bilhões de anos atrás, quando, espaço, tempo e matéria teriam se formado em um início extremamente quente e denso, tendo se expandido e esfriado, dando origem a todos as estruturas do Universo atual. Esse modelo científico, associado a um processo de rápido crescimento, conhecido como inflação, é base de grande parte das teorias cosmológicas modernas, sendo apoiado por diversos fatos observacionais.

Bioassinatura — Alteração (marca/assinatura) deixada em um ambiente por um organismo vivo. Essas assinaturas podem ser classificadas de acordo com sua natureza: *moleculares* (podendo ser diretas, como biomoléculas, ou indiretas, pela alteração química do ambiente, como oxigênio na atmosfera ou os minerais oxidados da crosta), *morfológicas* (como fósseis) e *tecnológicas* (como sinais de rádio, laser ou mesmo estruturas artificiais).

Biochip — Tecnologia utilizada para realizar experimentos (reações bioquímicas) em estruturas miniaturizadas. Pode ser considerado um laboratório em escala microscópica, trabalhando com volumes de solução tipicamente de microlitros.

Biosfera — Conjunto de ecossistemas da Terra, onde há seres vivos. Com a descoberta dos organismos extremófilos, o conceito de biosfera tem se estendido desde o fundo dos oceanos e mesmo quilômetros abaixo da superfície, nas rochas, até o alto da atmosfera.

Buraco negro Região no espaço-tempo com campo gravitacional tão intenso que nem mesmo a luz consegue escapar. Tipicamente são formados em processos estelares, no término da evolução de estrelas massivas, ou por acréscimo de massas em estrelas menores.

Catalisador Material que diminui a energia de ativação de uma reação, aumentando sua velocidade, mas sem ser consumido durante o processo.

Cátion Íon com carga positiva.

Cianobactéria Bactéria que obtêm energia celular através da fotossíntese.

Clorofila Grupo de pigmentos fotossintéticos presentes nos cloroplastos de algas e plantas. Possui um grupo porfirínico substituído por um centro de Mg como grupo cromofórico central.

Cloroplasto Organela de origem provavelmente endossimbiótica presente em células de algas e plantas, responsável pela fotossíntese.

Código genético Código que relaciona a sequência de bases do DNA com as sequências de aminoácidos nas proteínas. A tradução da linguagem genética para a proteica acontece no processo de síntese no ribossomo, com auxílio de moléculas de RNA mensageiro, transportador e ribossômico.

Cometa Corpos menores que orbitam o Sol, apresentando uma cauda visível ao se aproximar

	deste, pela evaporação e ionização de seu material. Provavelmente se formaram pela condensação da nebulosa primitiva do Sistema Solar, 4.6 bilhões de anos atrás, preservando sua constituição de gases voláteis e grãos em um núcleo criogênico. Têm importância para os estudos da origem e evolução química do Sistema Solar, especialmente para a explicação do aporte de elementos voláteis para a Terra, inclusive a água.
Cromossomo	Trecho do genoma que contém diversos genes, composto por uma única molécula de DNA. Um organismo pode ter um ou mais cromossomos.
Cultura	Em microbiologia, uma cultura é um conjunto de micro-organismos crescidos em condições controladas em laboratório. Estima-se que apenas uma pequena parte (cerca de 1%) de todos os micro-organismos presentes na natureza possa ser mantida de maneira estável em cultivos de laboratório.
Curiosity	Nome do *rover* norte-americano (Nasa) que pousou em Marte em 2012 (cratera Gale), ainda operacional. Também conhecido como *Mars Science Laboratory*, tendo o objetivo de estudar o passado geológico e hidrológico do planeta, para melhor compreender sua habitabilidade.
Darwinismo (evolução darwiniana)	Teoria evolutiva dos organismos vivos com base em variação fenotípica entre indivíduos (decorrente de variabilidade genética, mutações etc.) e herança dessas características.

Adicionalmente, diversos processos podem limitar essa variabilidade fenotípica pelo sucesso reprodutivo de algum variante (seleção natural, deriva gênica, efeito fundador etc.). Importante lembrar que a evolução biológica não é direcional, previsível ou geradora de complexidade (necessariamente). A teoria da evolução é uma das teorias mais bem-sucedidas da ciência moderna, fortemente embasada em fatos, experimentos em laboratório e modelos teóricos.

Deriva gênica Mudança na frequência de alelos em uma população devido à amostragem aleatória de organismos presentes em gerações subsequentes.

Difusão Redistribuição de átomos, moléculas ou partículas em um sistema, tendendo, pelos princípios termodinâmicos, de partir de concentrações desiguais para um sistema homogêneo e isotrópico. Movimento de partículas de regiões mais concentradas para menos concentradas.

Dinossauros não avianos Tecnicamente, o termo "dinossauro" necessariamente inclui as aves modernas, e o termo "não aviano" procura evitar essa derivação mais moderna. No entanto, há diversas espécies fósseis intermediárias descritas que já apresentam fenótipos avianos.

DNA (ADN) Ácido desoxirribonucleico. É composto de uma dupla hélice formada por dois polímeros de nucleotídeos, mantida unida e estável por ligações de hidrogênio. São as

	macromoléculas/biopolímeros que armazenam a informação genética em grande parte dos organismos vivos.
Domínio	O nível mais elevado utilizado na classificação científica dos seres vivos. O esquema de classificação mais usado é constituído de três domínios: Archaea (Arqueia), Bacteria (Bactéria) e Eukarya (Eucarioto).
Dormência	Estado celular caracterizado por diminuição das taxas de reações metabólicas, e, tipicamente, com ausência de reprodução.
Ediacarano	Último período do Proterozoico, conhecido pela explosão de diversidade animal.
Elétron	Partícula subatômica elementar, segundo o modelo padrão, com carga negativa (lépton). Nos átomos, neutraliza a carga positiva dos prótons, tornando-os eletricamente neutros.
Entropia	Função de estado termodinâmica que mede o número de microestados possíveis em um sistema termodinâmico. Pode ser relacionado com o grau de "desordem" do sistema, e, para um sistema isolado, a segunda lei da termodinâmica afirma que a entropia do sistema sempre irá aumentar. O mesmo não é válido para um sistema em interação, onde pode haver diminuições locais de entropia (como é o caso de sistemas biológicos que se auto-organizam ao custo da desorganização de seu ambiente).

Enzima Biomolécula, geralmente de natureza proteica, que apresenta capacidade de catalisar reações químicas.

Era geológica Divisões de tempo geológico, marcadas por variações significativas nas condições e eventos do planeta.

ESA Agência Espacial Europeia (*European Space Agency* em inglês)

Espécie Classificação biológica que delimita um grupo de organismos semelhantes. Atualmente, são usados critérios ecológicos, morfológicos, bioquímicos e genéticos para definir uma nova espécie.

Espectroscopia Termo utilizado por toda técnica científica de análise com a qual são coletados dados de alguma partícula (incluindo fótons, os *quanta* da luz, ou radiação eletromagnética) de acordo com a sua energia.

Estrela Corpo celeste com massa suficiente para iniciar reações de fusão nuclear de hidrogênio em seu interior, desencadeadas por sua própria gravidade.

Estromatólito Estrutura estratificada (em camadas) formada pela precipitação de minerais por micro-organismos, geralmente biofilmes de cianobactérias.

Eucariontes Organismos cuja organização celular inclui uma membrana nuclear, separando o material genético principal do citoplasma.

Eucariotos (Eukarya)	Domínio da vida caracterizado principalmente por células contendo organelas membranosas e um núcleo abrigando o material genético.
Evolução	Descendência com modificação. Processo que explica a diversificação da vida terrestre, baseado em fatos observacionais e experimentais.
Exoplaneta	Planeta não pertencente ao nosso Sistema Solar, orbitando outra estrela ou mesmo vagando livre pelo espaço interestelar.
Exploração espacial	Ato de explorar o espaço, seja usando sondas robóticas ou naves tripuladas.
Extremófilo	Organismo que possui adaptações celulares, metabólicas e ecológicas para sobreviver em ambientes extremos. Podem ser extremo-tolerantes (apenas toleram essas condições extremas, porém não são suas condições ótimas de crescimento) e extremófilos estritos (cujo crescimento, reprodução etc. ocorrem apenas em condições extremas).
Fagocitose	Captura e englobamento de uma partícula, possivelmente uma célula, por outra, em um processo ativo e com gasto de energia.
Fanerozoico	Intervalo do tempo geológico que abrange desde 542 milhões de anos atrás até os dias atuais. Caracterizado, entre outras coisas, pelo surgimento de uma abundante evidência fóssil de animais com partes rígidas.

Fenótipo	Características físicas e fisiológicas observáveis em um organismo.
Fixação (do nitrogênio ou carbono)	Processo biológico de obtenção dos elementos nitrogênio ou carbono a partir de fontes inorgânicas, como da atmosfera (a partir de N_2 e CO_2).
Luminescência	Processo em que uma espécie química absorve energia eletromagnética (por excitação eletrônica) e a reemite em um comprimento de onda diferente.
Fonte hidrotermal	Emergência de águas subterrâneas aquecidas por atividade geotérmica ou vulcanismo, podendo ocorrer na superfície da Terra ou no fundo dos oceanos.
Fóssil	Marca ou padrão morfológico ou molecular deixado por seres vivos preservados em estruturas geológicas.
Fóton	Partícula fundamental carregadora da força eletromagnética.
Fotossíntese	Processo realizado por seres vivos em que energia luminosa é convertida em energia química, disponibilizada para funções celulares, como a fixação do carbono.
Fumarola negra	Tipo de fonte hidrotermal caracterizada pela formação de minerais escuros (principalmente devido à alta concentração de S e Fe) precipitados em forma de chaminé.

Gabroica (rocha) Rocha ígnea intrusiva (de origem vulcânica), de coloração escura e com granulação média a grossa, formada a partir do resfriamento de magmas de composição basáltica.

Galáxia Conjunto de vários sistemas estelares ligados gravitacionalmente, como a Via Láctea. Muitas galáxias têm, em seu centro gravitacional, um buraco negro supermassivo.

Gelo glacial (glaciar) Gelo formado a partir da precipitação e compactação da neve nas regiões polares e alpinas da Terra. Sua coloração varia de branco a azul profundo, dependendo da pressão a que foi sujeito, podendo ser altamente transparente.

Gene Sequência do material genético que codifica uma molécula de RNA funcional ou que é expressa em uma proteína.

Genoma O conjunto total do material genético de um organismo, incluindo todos os genes e todas as regiões não codificantes.

Genótipo Parte do genoma que determina uma característica de um organismo.

Grandes extinções Eventos identificados no registro fóssil em que houve grande perda da biodiversidade no planeta em um intervalo relativamente curto de tempo.

Habitabilidade Potencial de uma região ou corpo celeste de abrigar vida. Obviamente depende da

	definição de vida usada, mas a mais comum se baseia na presença de água em estado líquido na superfície.
Hadeano	Primeiro intervalo do tempo geológico. Tem início com a formação da Terra (há cerca de 4,6 bilhões de anos atrás). Foi seguido pelo arqueano.
Haloarqueias	Micro-organismos do domínio Archaea que são adaptados ao crescimento em altas concentrações de sais, ou seja, halofílicos.
Halofílico (halófilo)	Organismo que cresce melhor em altas concentrações de sais.
Hidrofílico	Material com afinidade por água e soluções aquosas (normalmente por ser polar).
Hidrofóbico	Material que repele água (normalmente por ser apolar).
Hidrólise	Quebra de ligações químicas envolvendo moléculas de água.
Higroscópico	Molécula ou composto que possui propriedade de absorver moléculas de água.
Hipersalinos	Ambientes cuja concentração de sais (especialmente NaCl) é superior à da água do mar.
Hipertermofílico (hipertermófilo)	Organismo que necessita de temperaturas acima de 85 °C para o crescimento.
Homologia	A existência de ancestralidade em comum entre estruturas ou genes.

Infravermelho	Região do espectro eletromagnético com comprimentos de onda maiores que o da luz visível (tipicamente acima de 1000 nm).
Íon	Espécie química carregada eletricamente, resultante de um átomo ou molécula que perdeu ou ganhou elétrons.
Isômeros	Moléculas com a mesma composição química, mas com estruturas distintas.
Ligação peptídica	Ligação química entre dois aminoácidos, em que um grupo amina de um aminoácido se une ao grupo carboxila de outro aminoácido, liberando uma molécula de água (H_2O).
Líquens	Associação simbiótica entre algas (incluindo bactérias do grupo cianobactéria) e fungos.
Lua	Satélite natural que orbita um planeta.
LUCA	Último ancestral comum universal (*Last Universal Common Ancestor* em inglês). Organismo do qual todas as formas de vida atuais seriam descendentes, segundo certa filogenia.
Meiose	Divisão celular eucariótica especializada que resulta em diminuição do número de cromossomos pela metade. Normalmente envolvida no processo de formação de gametas.
Metabolismo	Conjunto de reações químicas que mantém o funcionamento da célula.

Meteorito Fragmento de rocha espacial (gerada pela fragmentação de algum corpo maior, ou de origem do Sistema Solar primitivo), após passagem pela atmosfera e queda na superfície da Terra.

Micro-organismo Ser vivo composto por uma única célula, geralmente pequeno demais para ser observado a olho nu (abaixo de 50 mm). Inclui também os vírus, na maioria dos esquemas classificatórios.

Mitocôndria Organela que realiza as reações de respiração celular em organismos eucarióticos, produzindo ATP para o metabolismo. Possivelmente de origem endossimbiótica, como os cloroplastos.

Multicelular Organismo vivo formado por mais do que uma célula.

Mutação Modificação na sequência nucleotídica do genoma de um organismo. Pode ser temporária ou reversível, podendo levar a mudanças de fenótipo (incluindo diversas disfunções celulares e doenças, mas também variabilidade positiva, promovendo maior sucesso reprodutivo em alguns casos), dependendo de sua localização.

NAD+ Nicotinamida adenina dinucleotídeo.

NADH Forma reduzida do NAD+.

NADP+ Nicotinamida adenina dinucleotídeo fosfato.

NADPH Forma reduzida do NADP+.

Nanobactéria Material orgânico encontrado em amostras ambientais interpretado como possíveis formas de vida com tamanho muito inferior ao dos micro-organismos conhecidos (abaixo de 100 nm).

Nasa Agência espacial norte-americana (*National Aeronautics and Space Administration* em inglês).

Nêutron Partícula subatômica sem carga, presente no núcleo de um átomo. Interage com os prótons por força nuclear forte, mantendo a estabilidade de núcleos de alto número atômico (Z).

Núcleo Região central de um átomo, onde estão localizados os prótons e os nêutrons.

Nucleotídeo Unidade mínima (monômero) dos ácidos nucleicos (RNA e DNA).

Órbita Trajetória percorrida por um corpo através do espaço, levando em conta as interações gravitacionais e outras forças possivelmente presentes. Podem ser fechadas, como as órbitas circulares ou elípticas de planetas, ou abertas, como as hiperbólicas, de alguns cometas ou sondas de pesquisa lançadas para o espaço profundo.

Organela Estrutura subcelular que executa alguma função específica do metabolismo.

Oxidação	Processo químico no qual ocorre a alteração do estado de oxidação em um átomo ou molécula, para valores positivos.
Paleobiologia	Estudo da história passada da vida utilizando o registro fóssil como principal objeto de pesquisa.
Panspermia	Teoria que propõe que a vida pode ser transferida por processos naturais ou artificiais através do espaço, efetivamente permitindo que se espalhe e colonize novos planetas ou sistemas estelares.
Peptídeo	Polímero de aminoácidos, formado através de ligações peptídicas entre eles.
Permafrost	Solo de regiões alpinas e polares cuja temperatura é permanentemente abaixo de 0 °C, mantendo a matriz de água do solo congelada entre milhares e milhões de anos. Representam importante repositório de biodiversidade antiga preservada.
pH	Escala numérica da concentração de cátions de hidrogênio em uma solução aquosa. Usada para indicar acidez ou alcalinidade.
Planeta-anão	Corpo celeste que não atinge o requisito de ocupar uma órbita exclusiva ao redor de sua estrela para ser considerado um planeta, coexistindo com corpos menores, como asteroides.
Planeta	Corpo celeste que ocupa uma órbita exclusiva ao redor de uma estrela, com massa

suficiente para adquirir formato aproximadamente esférico (devido aos efeitos gravitacionais), mas não a ponto de iniciar reações de fusão nuclear.

Polimerização Reação em que vários compostos iguais (monômeros) ou similares se unem sequencialmente para formar moléculas maiores.

Pré-cambriano O maior intervalo do tempo geológico que (incluindo o Hadeano) se estende desde a formação do planeta, há cerca de 4,6 bilhões de anos, até cerca de 540 milhões de anos atrás, quando se inicia o Fanerozoico.

Procarioto Organismo unicelular caracterizado principalmente pela ausência de um núcleo definido e organelas membranosas, como bactérias e arqueias.

Proteína Polímero de aminoácidos. Presentes nos organismos vivos desempenhando diversos papéis como: estruturais, mecânicos e catalíticos.

Proteoma Conjunto total de proteínas expressadas por uma célula.

Proterozoico Intervalo do tempo geológico que ocorreu entre 2,5 bilhões e 542 milhões de anos atrás. Caracterizado por diversas formas de vida primitivas e pela oxigenação da atmosfera pelos organismos fotossintetizantes. Seguido pelo Fanerozoico.

Próton Partícula subatômica com carga positiva, presente no núcleo de um átomo.

Protoplaneta Objeto formado por flutuações de densidade em meio ao denso disco de gás e poeira que circunda estrelas recém-formadas. Agregando massa suficiente, podem evoluir para formar planetas.

Psicrofílico (psicrófilo) Organismo que necessita ou é capaz de crescer em temperaturas baixas (tipicamente abaixo de 15 °C).

Química prebiótica Estudo das reações químicas na Terra primitiva que poderiam ter dado origem aos primeiros seres vivos.

Quiralidade (quiral) Propriedade de moléculas de composição elementar idêntica, mas com estruturas que são imagens espelhadas umas das outras (isômeros óticos). Biomóleculas geralmente se apresentam apenas em uma dessas formas (praticamente todos os açúcares utilizados pela vida na Terra são do tipo D e todos os aminoácidos são do tipo L).

Racêmico Característica de uma mistura química em proporções iguais de um composto com seu isômero quiral.

Radiação eletromagnética Forma de propagação de energia na forma de ondas eletromagnéticas (campos elétricos e magnéticos ortogonais defasados), ou de sua versão quantizada, os fótons. A distribuição de energia dos fótons (o comprimento de onda da luz em questão) constitui o espectro eletromagnético.

Radiação ionizante Radiação eletromagnética com energia suficiente para retirar ao menos um elétron de um estado ligado de um átomo ou material para o contínuo (efeito fotoelétrico), tornando-o carregado eletricamente (ionizado).

Radiação ultravioleta Radiação eletromagnética com comprimento de onda entre 100 e 400 nanômetros, mais curta que o espectro de luz visível e mais longo que os raios X.

Radiotelescópio Antena direcional utilizada para observar objetos remotos nos comprimentos de onda das frequências de rádio.

Radiotolerante Organismo que é resistente ou tolerante a doses de radiação ionizante de até 60 Gy/hora. Gy é unidade de dose de radiação, equivalente a deposição de 1 J em 1 kg de material.

Redução Processo químico em que ocorre a diminuição do estado de oxidação de um átomo ou molécula.

Refração Mudança de trajetória de um feixe luminoso cruzando meios em que sua velocidade de propagação é distinta.

Ressonância Delocalização dos elétrons de uma molécula em mais de uma única ligação química.

Ribossomo Complexo macromolecular que realiza a síntese de proteínas utilizando a informação trazida pelo RNA transportador e catalisando a formação de ligações pépticas entre os aminoácidos trazidos pelo RNA transportador.

Ribozima Molécula de RNA com capacidade de atuar como catalisadora (similar às enzimas).

RNA (ARN) Ácido ribonucleico. Possui diversas funções biológicas, como a de carregar a informação do DNA para a síntese de proteínas nas células, faz parte da estrutura dos ribossomos, responsável pelo transporte de aminoácidos durante a síntese proteica e também regula a expressão gênica. Como molécula polivalente, pode mesmo ter sido a primeira molécula com funções autorreplicantes a surgir no planeta, como proposto pela Teoria do Mundo de RNA.

Rover Sonda robótica móvel utilizada na exploração da superfície de corpos celestes rochosos (planetas, luas etc.).

Satélite Um corpo celeste ligado gravitacionalmente e orbitando um corpo celeste maior. Pode ser natural, como a Lua, ou artificial, como os satélites e sondas espaciais produzidos pelo homem.

Seleção natural Sobrevivência e reprodução diferencial de indivíduos devido a diferenças fenotípicas que modificam sua interação com o ambiente ou outros organismos. Essa sobrevivência necessariamente faz que o indivíduo consiga deixar número maior de descendentes comparado aos outros indivíduos de sua população.

SETI Programa denominado "Procura de Inteligência Extraterrestre" (*Search for*

	Extraterrestrial Intelligence em inglês). Conforme o nome diz, procura pelo cosmos sinais de rádio ou luz que possam ser emitidos por uma civilização inteligente tecnologicamente desenvolvida e comunicante.
Sistema planetário	Sistema de objetos celestes não estrelares que orbitam uma estrela. O Sistema Solar é um exemplo, mas diversos outros sistemas estão sendo descobertos atualmente.
Sistema Solar	Sistema planetário com o Sol como estrela central.
Substituição	Mutação que passa a estar presente na totalidade dos indivíduos de uma população.
Supernova	Explosão de uma estrela por efeito termonuclear ou dinâmico, no caso de estrelas massivas no final de sua vida. Tipicamente liberam grandes quantidades de energia cinética, térmica e radiativa ($> 10^{44}$erg/s), permitindo a síntese e dispersão de elementos químicos de número atômico alto ($Z > 26$).
Tectonismo	Movimentos na crosta terrestre com origem no interior do planeta.
Telescópio	Instrumento científico utilizado para observar objetos remotos pela análise da radiação que chega até eles. Trabalham principalmente com a detecção de radiação eletromagnética (em uma ampla faixa espectral, do rádio até os raios gama), mas podem ser usados também detectores diretos ou

	indiretos de partículas (como os netrinos ou outros raios cósmicos) e até mesmo de ondas gravitacionais.
Termofílico (termófilo)	Organismo que necessita (no caso de termofílico estrito) de temperaturas entre 45 e 85°C para o crescimento.
Tradução (biologia)	Processo biológico da síntese de proteínas a partir do RNA. Relaciona cada sequência de três nucleotídeos do RNA em um aminoácido da proteína sendo sintetizada, usando um código comum a todos os organismos vivos.
Transcriptoma	Conjunto de todo RNA produzido por um ou mais organismos sob uma determinada condição de crescimento.
Ultravácuo	Condição de baixa pressão, tipicamente abaixo de 1×10^{-7} Pa.
Unicelular	Organismo vivo formado por uma única célula.
Vantagem adaptativa	Característica fenotípica que permite sobrevivência e reprodução diferencial de um organismo.
Vírus	Sistema biológico composto primariamente por um conjunto informacional de DNA ou RNA e diferentes tipos de encapsulamento, que só é capaz de se replicar utilizando a maquinaria metabólica de uma célula que venha a infectar.

Zona habitável Em sua definição mais usada, criada por Kasting (1993), a zona habitável (estelar) é a região ao redor de uma estrela onde é possível a presença estável de água líquida na superfície de um planeta.

A Astrobiologia é uma área recente de pesquisa científica, que procura entender o fenômeno da vida em nosso Universo, não se restringindo apenas à vida na Terra, ou mesmo à vida como a conhecemos. Ela aborda algumas das questões mais complexas sobre os sistemas biológicos, como sua origem, evolução, distribuição e futuro, na Terra e, possivelmente, em outros planetas e luas. Por ser multi e interdisciplinar é, acima de tudo, uma ferramenta para facilitar a comunicação e interação entre especialistas de diferentes áreas, e também com a população em geral, já que trata de temas que despertam o interesse geral.

Pela primeira vez, temos as ferramentas tecnológicas e o rigor científico à disposição para lidar com alguns dos problemas mais complexos e antigos da humanidade: De onde viemos? Para onde vamos? Estamos sozinhos no Universo? A Astrobiologia procura responder essas perguntas baseando-se na história da vida na Terra e suas relações com o planeta, extrapolando esse conhecimento para o desenvolvimento de metodologias para o estudo de outros mundos, seja com robôs, missões tripuladas ou técnicas astronômicas. Os cientistas dessa área estão desbravando novas fronteiras do conhecimento humano, mas esse é apenas o início desse esforço interdisciplinar e internacional, que já está se estabelecendo também no Brasil.

Nesta primeira edição de *Astrobiologia – uma ciência emergente,* reunimos textos de pesquisadores de diversas áreas científicas, que abordaram desde a origem da vida, passando pelas luas de nosso Sistema Solar com possíveis condições de abrigar vida, até as viagens interestelares e os exoplanetas que foram descobertos nos últimos anos.

9 788566 241037